
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KAPASİTE ARTIRIMI PLANLAMALARI İÇİN KAYNAK BOYUTU VE KONUMUNUN BOZKURT ALGORİTMASI TABANLI BELİRLENMESİ

Uğur FESLİ

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Uğur FESLİ
06/11/2023

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KAPASİTE ARTIRIMI PLANLAMALARI İÇİN KAYNAK BOYUTU VE KONUMUNUN BOZKURT ALGORİTMASI TABANLI BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Uğur FESLİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2023

ÖZET

Güç sistemleri, üretim, iletim ve dağıtım bölümlerini içeren karmaşık ağ yapılarıdır. Bu karmaşık ağlar, elektrik enerjisinin güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde tüm tüketici noktalarına iletilmesini sağlar. Güç sistemlerine artan yükler ve ortaya çıkan enerji ihtiyaçlarını karşılamak adına mevcut kaynaklardaki güç artışı veya sisteme eklenen yeni kaynaklardan dolayı tüm sistemdeki güç akışları, hat yüklenmeleri ve gerilim profilleri farklılıklar göstermektedir. Bu farklardan dolayı sisteme eklenen yeni kaynaklar kararlılık problemlerine yol açabilmektedir. Dolayısıyla, yeni üretim kaynaklarının eklendiği bir sistem daha da karmaşık hale gelecektir. Yeni kaynakların sisteme uygun planlanma yapılmadan yerleştirilmesi durumunda şebekede fazladan üretim, koruma ve topraklama problemleri, gerilim yükselmeleri, aşırı hat yüklenmeleri gibi çeşitli problemlere yol açabilirler. Bu tez çalışmasında, güç sistemin kararlı çalışmasını sürdürmesi amacıyla generatörlerin gücünü ve optimum konumunu belirleyen Bozkurt Algoritması tabanlı bir optimizasyon yapısı oluşturulmuştur. Önerilen yöntemle, gerilim kararlılığı ve aşırı yükleme sorunlarını ortadan kaldırmak için ihtiyaç duyulan yeni kaynağın optimum konumu ve güç kapasitesi belirlenmektedir. DIgSILENT PowerFactory programında benzetimi yapılan sistem üzerinde Python scriptleri ile birlikte Bozkurt Optimizasyon Algortiması kullanılarak standart bir IEEE bara sistemine dahil edilecek yeni kaynakların boyutu ve konumu belirlenmiştir. Farklı senaryolarla, bir noktada, üç noktada ve altı noktada yük artışları tanımlanmış meydana gelen problemlerin çözümü için üretim tabanlı çözüm önerileri elde edilmiştir. Bu çözüm önerileri Bozkurt Optimizasyon Algoritması kullanılarak optimum çözümler bulunmuştur. Optimum çözüm önerileri benzetim programında denenmiş ve generatör yüklenmeleri, üretim tüketim dengesi, hat yüklenmeleri ve bara gerilim değerleri karşılaştırılarak çözüm önerilerinin doğruluğu ispatlanmıştır.

Bilim Kodu	:	90513
Anahtar Kelimeler	:	Güç sistemleri, güç sistemlerinde optimizasyon, güç sistemlerinde kararlılık
Sayfa Adedi	:	137
Danışman	:	Doç. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR

GRAY WOLF ALGORITHM-BASED DETERMINATION OF SOURCE SIZE AND LOCATION FOR CAPACITY EXPANSION PLANNING IN POWER SYSTEMS

(Ph. D. Thesis)

Uğur FESLİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2023

ABSTRACT

Power systems are complex network structures that include generation, transmission, and distribution parts. The safe, efficient, and uninterrupted transfer of electricity energy to consumer points is provided by these complex systems. The power flow in a power system can be changed depending on load demand and generation. To meet the increment in load demand, new sources are added to the power system. Therefore, the complexity of the power system will increase and the system stability may vary due to these changes. The location of the new generation systems has vital importance in terms of efficiency, grounding, overload, overvoltage, and protection system issues. In this thesis, the power capacity and location of the new generation system needed in the case of an increment in load demand are determined based on Gray Wolf Optimization Algorithm. The optimum location and power capacity of the new source that is needed to eliminate the voltage stability and overloading issues are determined by the proposed method. The proposed is tested on IEEE 14-Bus Standard Test System. The simulation studies are performed on DIgSILENT PowerFactory software. Four different scenarios that include load demand increment in one location, two locations, three locations and six locations are tested in simulations. The Python scripts are created to determine the required power capacity and location of the new generations by considering fourteen buses. The possible solution list is obtained by using this Script. Then, the obtained solutions are evaluated in the GWO's cost function which includes power transmission and required power capacity. Thus, the optimum solution is suggested by the GWO that determines the location and power capacity of the new source is determined. The obtained optimum solution is tested in the simulation. The results reveal that the system stability issues are cleared by applying the optimum solution.

Science Code	:	90513
Key Words	:	Power Systems, Optimization in Power Systems, Stability in Power Systems
Page Number	:	137
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimimde verdiği destekle, bu tez çalışmasının hazırlanması süresince sağladığı bilgi, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR'e, değerli görüş ve önerileriyle tez çalışmama yön veren hocalarım Sayın Prof. Dr. Hüseyin Usta, Sayın Doç. Dr. Naki Güler, Sayın Prof. Dr. Necmi ALTIN ve Sayın Prof. Dr. Şaban ÖZDEMİR'e ,tez çalışmamın son halini almasında değerli fikir ve görüşleriyle katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Mustafa Aktaş ve Doç. Dr. İpek AYTAÇ'a, çalışmalarım boyunca destekleriyle her zaman yanımda olan Prof. Dr. Sertaç BAYHAN, Prof. Dr. Şevki DEMİRBAŞ ve Sayın Öğr. Gör. Dr. Murat AKIN'a, Öğr.Gör.Dr. Ufuk TASCI, Öğr. Gör. Dr. Taha Alper YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında anlayışla ve sevgiyle bana destek olan eşim Kübra FESLİ'ye çocuklarım Tuğra FESLİ ve Serra FESLİ'ye sonsuz teşekkürler.

Ayrıca bu tez çalışmasının hazırlanmasında Katar Uluslararası Araştırma Fonu (QNRF)'na NPRP12C-33905-SP-213 numaralı proje kodu ile verilen destekler için teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

1. GİRİŞ 1

2. GÜÇ SİSTEMLERİ VE BİLEŞENLERİ 9

2.1. Güç Sistemlerinde Fiziksel Bileşenler 9

2.1.1. Üretim birimleri 10

2.1.2. Transformatör 11

2.1.3. İletim hattı 13

2.1.4. Bara 14

2.1.5. Yük 14

2.2. Güç Sistemlerinin Temel Özellikleri 16

3. GÜÇ SİSTEMLERİNİN PLANLANMASI 19

3.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Planlama Yöntemleri 19

3.2. Üretim Kaynaklarında Optimal Planlama Modelleri 20

3.3. Standart Bara Sistemleri 21

3.3.1. Güç sistemi modellerinde bara tipleri: 22

3.3.2. IEEE 14 Bara test sistemi modeli ve özellikleri 24

3.4. Yeni Üretim Kaynaklarının Sisteme Etkisi 26

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK 31

4.1. Güç Sistemlerinde Kararlılıkların Sınıflandırılması 31

4.1.1. Açısal kararlılık 33

Sayfa

4.1.2. Frekans kararlılığı 34

4.1.3. Gerilim kararlılığı 35

4.2. Gerilim Kararlılığını Etkileyen Unsurlar/Faktörler ve Analiz Yöntemleri 40

4.2.1. Yük akış analizi 42

4.2.2. P-V Eğrileri 45

5. METASEZGİSEL ALGORİTMALAR VE OPTİMİZASYON 47

5.1. Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Sınıflandırılması 49

5.2. Metasezgisel Algoritmalar ve Güç Sistemlerine Uygulanması 50

5.3. Bozkurt Optimizasyonu Algoritması (BOA) 56

5.4. Bozkurt Hiyerarşisi 56

6. GÜÇ SİSTEMLERİNİN BENZETİMİ VE GERİLİM KARARLILIĞI AÇISINDAN OPTİMİZASYONU 63

6.1. Güç Sistemlerinin Bilgisayar Ortamında Benzetimi 64

6.1.1. Güç sistemi donanımlarının modellenmesi 65

6.1.2. IEEE 14 Baralı test sisteminin DIgSILENT powerfactory'de modellenmesi 67

6.2. Kararlılık Unsurlarına Göre Optimizasyon Algoritmasının Geliştirilmesi 72

6.2.1. Güç sisteminde gerilim kararsızlığına yol açan etkenlerin belirlenmesi .. 73

6.2.2. Yüklenebilirlik kapasitelerinin belirlenmesi 73

6.3. Benzetim Modeli ile Optimizasyon Algoritmasının Tümleşik Çalıştırılması 76

7. BENZETİM SONUÇLARI 79

7.1. Maksimum Yüklenebilirlik Kapasitelerinin Belirlenmesi 80

7.2. Çözüm Önerilerinin Tespit Edilmesine Ait Benzetim Sonuçları 95

7.2.1. Senaryo 1: 14 baralı test sisteminde tek noktada yük değerinin artışı durumunda çözüm önerilerinin tespiti 95

7.2.2. Senaryo 2: 14 baralı test sisteminde farklı noktalarda yük değerinin artışı durumunda çözüm önerilerinin tespiti 101

Sayfa

7.3.Optimum Kaynak Boyutu ve Yerinin BOA Kullanılarak Belirlenmesine Ait Benzetim Sonuçları 108

7.3.1. Senaryo 3: farklı noktalarda yük değerinin artışı, çözüm üretilmesi ve BOA ile optimum çözüm seçimi 108

7.3.2. Senaryo 4: 6 ayrı noktada yük değerinin artışı, çözüm üretilmesi ve BOA ile optimum çözüm seçimi 117

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 123

KAYNAKLAR 125

ÖZGEÇMİŞ 136

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Bara tipleri ve ilgili parametreler 23

Çizelge 3.2. IEEE 14 Bara parametreleri 25

Çizelge 3.3. IEEE 14 Bara hat bilgileri 25

Çizelge 3.4. IEEE 14 Bara yük bilgileri 26

Çizelge 3.5. IEEE 14 bara generatör bilgileri 26

Çizelge 4.1. Gerilim kararlılık analizi için kullanılan yöntemler ve kullanım amaçları 40

Çizelge 5.1. Bazı Metasezgisel Algoritmalar ve Örnek Uygulamaları 55

Çizelge 6.1. Gerilim Seviyeleri ve Nominal Voltaj değerleri 68

Çizelge 6.2. Optimizasyon Çözüm Parametreleri 78

Çizelge 7.1. IEEE 14 Bara Normal Çalışma Değerleri 79

Çizelge 7.2. Çözüm Kısıtları 97

Çizelge 7.3. Yük artışının değerler üzerine etkisi 102

Çizelge 7.4. En iyi 5 Çözüm 113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. 9 Baralı bir güç sistemi 10

Şekil 3.1. IEEE 14 Baralı (14 bus) standart test sistemi modeli 24

Şekil 4.1. Güç Sistemlerinde Kararlılık Unsurları 32

Şekil 4.2. İki bara arasındaki bir elektrik iletim hattının eşdeğer devresi..... 36

Şekil 4.3. İki kaynaklı bir güç sisteminin hat modeli 38

Şekil 4.4. Bara sayısı *i* olan bir güç sistemi 43

Şekil 4.5. Tek generatörlü yük barası eşdeğer devresi..... 45

Şekil 4.6. P-V grafiği 46

Şekil 5.1. Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması..... 49

Şekil 5.2. Güç sistemi kararlılık problemlerine metasezgisel algoritmalar ile yaklaşım 51

Şekil 5.3. Bozkurt hiyerarşisi..... 56

Şekil 5.4. İki ve üç boyutlu konum vektörleri ve diğer muhtemel konumlar 58

Şekil 5.5. BOA konum güncellemesi..... 59

Şekil 5.6. Hedefe/Ava saldırma ve arayış..... 60

Şekil 5.7. Hedefe/Ava saldırma ve arayış..... 61

Şekil 6.1. Güç sistemi donanımları..... 66

Şekil 6.2. IEEE 14 Bara test sistemi DIgSILENT PowerFactory modeli..... 67

Şekil 6.3. Bara parametrelerinin girilmesi 69

Şekil 6.4. Referans makine ayar ekranı 69

Şekil 6.5. Generatör/Kaynak parametrelerinin girilmesi 70

Şekil 6.6. Yük parametrelerinin girilmesi..... 71

Şekil 6.7. Hat parametrelerinin girilmesi..... 72

Şekil 6.8. DIgSILENT PowerFactory ve Scriptlerin tanımlanması..... 74

Şekil 6.9. Maksimum yüklenme Scripti akış şeması 75

Şekil 6.10. Tümleşik çalışma modeli..... 76

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.11. Kaynak boyutu ve optimum yer tayini optimizasyon akış şeması 77

Şekil 7.1. Yük 2'nin alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 81

Şekil 7.2. Yük 3'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 82

Şekil 7.3. Yük 4'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 84

Şekil 7.4. Yük 5'in alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 85

Şekil 7.5. Yük 6'nın alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 86

Şekil 7.6. Yük 9'un alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 88

Şekil 7.7. Yük 10'un alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 89

Şekil 7.8. Yük 11'in alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 90

Şekil 7.9. Yük 12'nin alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları..... 91

Şekil 7.10. Yük 13'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları 93

Şekil 7.11. Yük 14'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları 94

Şekil 7.12. IEEE 14 bara Normal çalışma anındaki görüntüsü..... 96

Şekil 7.13. IEEE 14 bara (a) Normal ve (b)Yüklü Çalışma anında hat yüklenmeleri.... 97

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.14. Hat yüklenmelerini giderecek çözüm önerileri..... 98

Şekil 7.15. Çözüm 15 uygulamasında hattın ve baranın görüntüsü..... 99

Şekil 7.16. Çözüm 25 uygulamasında hattın ve baranın görüntüsü..... 100

Şekil 7.17. Yük 12 ve Yük 13 Normal Çalışma 101

Şekil 7.18. Yük artışının sistem üzerine etkisi..... 102

Şekil 7.19. Yük 12 ve 13'ün artışı için önerilen çözümler 103

Şekil 7.20. Yük12 ve Yük 13'teki güç artışları için önerilen çözümlerin uygulama görüntüleri (a) 15. Çözüm için Sistem Görüntüsü (b) 28. Çözüm için Sistem Görüntüsü (c) 200. Çözüm için Sistem Görüntüsü (d) 123. Çözüm için Sistem Görüntüsü (e) 70. Çözüm için Sistem Görüntüsü 104

Şekil 7.21. (devam) Yük12 ve Yük 13'teki güç artışları için önerilen çözümlerin uygulama görüntüleri (a) 15. Çözüm için Sistem Görüntüsü (b) 28. Çözüm için Sistem Görüntüsü (c) 200. Çözüm için Sistem Görüntüsü (d) 123. Çözüm için Sistem Görüntüsü (e) 70. Çözüm için Sistem Görüntüsü. 105

Şekil 7.22. (devam) Yük12 ve Yük 13'teki güç artışları için önerilen çözümlerin uygulama görüntüleri (a) 15. Çözüm için Sistem Görüntüsü (b) 28. Çözüm için Sistem Görüntüsü (c) 200. Çözüm için Sistem Görüntüsü (d) 123. Çözüm için Sistem Görüntüsü (e) 70. Çözüm için Sistem Görüntüsü. 106

Şekil 7.23. Çözümlerin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri..... 107

Şekil 7.24. Farklı Noktalarda 160 MW'lık Yük Artışı Olması Durumunda Sistem Görüntüsü..... 109

Şekil 7.25. Normal Çalışma ve Aşırı Yüklenme Durumlarında Yük Değerleri 109

Şekil 7.26. Normal Çalışma ve Yüklenme Durumlarında (a) Generatör Yüklenme Oranları, (b) Hat Yüklenme Oranları (c) Bara Gerilim Değerleri 110

Şekil 7.27. Normal Çalışma ve Yüklenme Durumlarında (a) Generatör Yüklenme Oranları, (b) Hat Yüklenme Oranları (c) Bara Gerilim Değerleri 111

Şekil 7.28. Çözüm Önerileri 112

Şekil 7.29. Senaryo 3 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları..... 115

Şekil 7.30. (devam) Senaryo 3 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları 116

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.31. Senaryo 4 Normal Çalışma ve 6 Noktada Yüklenme Durumlarında (a) Yük Değerleri (b) Generatör Yüklenme Oranları, (c) Hat Yüklenme Oranları (d) Bara Gerilim Değerleri..... 117

Şekil 7.32. (devam) Senaryo 4 Normal Çalışma ve 6 Noktada Yüklenme Durumlarında (a) Yük Değerleri (b) Generatör Yüklenme Oranları, (c) Hat Yüklenme Oranları (d) Bara Gerilim Değerleri 118

Şekil 7.33. Senaryo 4 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları..... 120

Şekil 7.34. (devam) Senaryo 4 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları 121

Şekil 7.35. Senaryo 4 Kaynaklarda Üretilen Güç ve Sistemde Bulunan Yük Miktarı ... 122

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
V	Gerilim
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
S	Görünür güç
Φ	Güç kat sayısı
R	Direnç
Z	Empedans
$\mathbf{V_P}$	Primer gerilimi
$\mathbf{V_S}$	Sekonder gerilimi
$\mathbf{N_P}$	Primer sargı
$\mathbf{N_S}$	Sekonder sargı
$\mathbf{X_L}$	Endüktif reaktans
$\mathbf{X_C}$	Kapasitif reaktans
Y	Admitans
k	Dönüştürme oranı
α	Alfa
β	Beta
δ	Delta
ω	Omega
I	Akım

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
pu	Per unit
BOA	Bozkurt optimizasyon algoritması
OGA	Optimum güç akışı

Kısaltmalar	Açıklamalar
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
AA	Alternatif akım
DA	Doğru akım
A	Amper

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, çağımızın en temel ve vazgeçilmez kaynaklarından biridir. Modern toplumun tüm alanlarında yaygın olarak kullanılan elektrik, endüstri, ulaşım, evler, iletişim, eğitim, sağlık hizmetleri ve daha birçok sektörde yaşamımızın merkezi bir parçası haline gelmiştir. Elektrik enerjisi, günlük yaşamımızı kolaylaştırmak, verimliliği artırmak ve ekonomik kalkınmayı desteklemek için kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda enerjinin hangi kaynaklardan üretilebileceği, iletilmesi ve tüketimi araştırmacıların odak noktalarından olmuştur. Günümüz dünyasında enerji kaynaklarının yetersizliği, gelişen teknolojiyle enerji tüketiminin hızla artması enerji konularında çalışmayı zorunlu hale getirmiştir.

Temel olarak bir güç sistemi, üretim, iletim ve dağıtım ağlarından meydana gelir. Bu karmaşık ağlar, elektrik enerjisinin güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde tüm tüketici noktalarına iletilmesini sağlar. Elektrik enerjisinin doğru kaynaklardan üretimi, kaynakların yer tayini ve güç sistemlerinin optimizasyonu, sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji altyapısı sağlamak için önemlidir [1]. Bu, enerji talebini karşılamak, çevresel etkileri azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve enerji kaynaklarını en etkin şekilde kullanmak için çeşitli stratejilerin ve teknolojilerin uygulanmasını gerektirir. Elektrik enerjisinin devamlılığı açısından, gücün kullanımı, enerji üretimi, kaynakların belirlenmesi, kaynak yerlerinin belirlenmesi, güç sistemlerinin önemi ve optimizasyonu, enerji sektörünün geleceği ve sürdürülebilirliği için kritik bir konudur. Güç sistemlerinin etkili bir şekilde işlemesi, enerji üretiminin ve dağıtımının optimize edilmesiyle mümkündür [1]. Optimizasyonlar, enerji kaynaklarının verimli kullanımını, iletim hatlarının kapasite ve güvenilirliğini, enerji talebinin yönetimini ve sistem operasyonunun optimize edilmesini hedefler. Dolayısıyla, enerji maliyetlerinin azaltılması, çevresel sürdürülebilirlik, enerji güvenliği ve sistem kararlılığı gibi faktörleri dikkate alır ve en uygun sonuçları verecektir [2].

Güç sistemlerinde kullanılan kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerinin kararlılığı açısından yer tayini, enerji sistemlerinin planlaması ve işletilmesi sürecinde önemli bir adımdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğru bir şekilde yer tayini yapılması, güç sistemlerinin kararlılığı ve güvenilirliği için kritik öneme sahiptir [3]. Kaynakların yer seçimi yapılırken kaynak potansiyelinin belirlenmesi, kaynakların optimal

kullanımı, iletim ve dağıtım ağının planlanması ve uygunluğu aynı zamanda çevresel etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yer tayini, güç sisteminde potansiyel olarak kullanılabilecek kaynakların (rüzgâr, güneş vb.) belirlenmesine yardımcı olur [4]. Rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgeler, güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgeler gibi tespitlerin yapılması kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlar.

Günümüzde güç sistemleri, ihtiyaç duyulan gücü karşılamak ve gücü son noktalara kadar iletmek amacıyla işletme sınırlarını en üst seviyelerde tutmaktadır. Bu durum iletim hatlarının uzunluklarının artması ve buna bağlı olarak enerji kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Bu koşullar altında çalışan güç sistemlerinde kararlılık problemleri oluşabilmekte ve arızalar meydana gelebilmektedir. Normal çalışma koşullarında çalışan bir sisteminin bir olumsuzluk meydana gelmesinden sonra kabul edilebilir seviyelerde sistemi tekrar sürdürebilme yeteneğine kararlılık denir [5]. Elektrik güç sistemlerinde yük artışı ve ihtiyaç duyulan güç üretimindeki artış; halihazırda kurulu olan güç sistemlerin işletmesi ve bu sistemlere dahil edilecek yeni üretim kaynaklarının planlanmasında farklı açılardan planlamaların yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu planlamalarda enerji kaynaklarının çeşitliliği, verim, güvenilirlik, esneklik, maliyet gibi faktörler güç sistemlerinin verimli, güvenilir, sürdürülebilir ve etkin bir şekilde işletilmesini sağlayacaktır.

Güç sistemlerinin değişken doğasından nedeniyle sistemde bulunan üretim birimleri ve yüklerin devreye alınıp çıkarılmasına bağlı olarak kararlılık sorunları ortaya çıkmaktadır. Doğrusal olmayan, zamana bağlı olarak değişen yük miktarı, güç sistemlerinin işletilmesinde ve gerilim kararlılığının analizinde kritik öneme sahiptir . Güç sistemlerindeki bu değişkenlik, genellikle talep dalgalanmaları, beklenmedik arızalar, hava koşullarındaki değişimler ve diğer faktörlerden kaynaklanabilir. Bu durum, güç sistemlerinin kararlılığını etkileyebilir ve bazı durumlarda güç kalitesinde düşüşlere veya sistem çökmesine yol açabilir. Bu nedenle, doğrusal olmayan, zamana bağlı olarak değişen yük miktarı güç sistemlerinin işletilmesinde ve gerilim kararlılığını analiz etmede önemli bir ölçüt olmaktadır[6]. Bu sebeple güç sisteminin yanlış planlanması veya analizi, kararsız çalışmalara neden olabilmektedir. Yanlış planlama veya analiz, güç sistemlerindeki birimlerin birbirleriyle olan etkileşimi, üretim ve tüketim miktarlarındaki değişkenliklerin göz ardı edilmesine veya sistem gereksinimlerinin eksik değerlendirilmesine yol açabilir. Bu durumda, güç sistemlerinde gerilim kararlılığı problemlerine yol açmaktadır. Gerilim

kararsızlığı sonucunda güç sistemlerinde kesintiler meydana gelmekte ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır [7]. Güç sistemlerinin analizi için kullanılan klasik hesaplamaların yerini, teknolojik gelişmelerde bağlı olarak yazılımlar ve benzetim programları almıştır. Özellikle, güç sistemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde yük akışı analizlerinde nümerik yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Güç sistemlerinin kararlılığı analizlerinde, sistemin optimum değerlerde çalışma şartları göz önünde bulundurulur. Güç sisteminin olabilecek en yüksek verim ile çalışması ve sistemde oluşabilecek bir bozucu etkiden sonra tekrar kararlı hale gelebilme yetenekleri kararlılık analizleri ile incelenmektedir. Bu analizler, değerlendirmeler ve incelemelerin sağlıklı yapılabilmesi için Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) tarafından belirlenen belli standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. IEEE tarafından belirtilen standartlarda, güç sistemlerinde oluşan yük dengesizliği, hat yüklenme oranları, güç kalitesi, yük ve enerji akışı, gerilimlerde meydana gelen dalgalanmalar vb. sistem parametrelerinin alt ve üst limitleri verilmektedir. Referans olarak alınan bu IEEE standartları, güç sistemlerinde global teknolojilerin ihtiyaçlarını karşılamakla birlikte gelişimini de katkıda bulunmaktadır. Böylelikle geniş bir teknoloji çeşitliliği ile endüstri standartlarının uygulanabilirliğini ve güvenliğini değerlendirerek sistemlerin uyum içinde ve kararlı olarak çalışmasını sağlamaktadır. Güç sitemlerinde en az olabilecek güvenlik marjının değerlendirilebilmesi için maksimum yükleme koşulunun hesaplanıp tespit edilmesi gereklidir. Minimum güvenlik marjı, sistem operatörleri tarafından güç sistemi güvenliğini devamlılığını sağlamak için düzeltici eylemler sunmak üzere uygulanan ana bir kriterdir [9]. Güç sistemlerine dahil edilecek yeni enerji kaynaklarının yer tayini ve boyutlandırması problemleri genellikle çok sayıda değişken ve kısıt içeren karmaşık optimizasyon problemleridir. Güç sistemlerine dahil edilen yeni üretim kaynaklarından dolayı güç akışı ve gerilim profillerinde önemli değişiklikler göstermektedir. Bu durum kararlılık problemlerine yol açmaktadır [10–12]. Sisteme yeni eklenen kaynaklar ve yük atma gibi yöntemler bu kararlılık problemlerinin çözümünde etkili olmaktadır. Bu yöntemlerle çözüm arayışında güç sistemi analizi ve incelemeleri yapılırken sistemin kararlı çalışma durumlarında, hat yüklenme kapasiteleri, generatör kapasiteleri ve bara gerilimleri parametreler yük değişiklikleri veya arıza durumlarında nasıl tepki vereceğini değerlendirir. Bu da yeni kaynakların sisteme dahil edilmesiyle birçok parametrenin değişmesi ve çok yönlü optimizasyon problemleri doğurmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için kaynak yeri seçimi ve boyutu daha oldukça büyük öneme sahiptir. Doğru kaynak yeri seçimi

ve boyutlandırma, sistemin verimliliğini ve performansını artırabilir. Bu, artan yük miktarına bağlı olarak ihtiyaç duyulan enerji üretiminde artış, enerji kayıplarının azalması ve sistemin genel performansının iyileştirilmesi anlamına gelmektedir. Sisteme dahil edilen kaynaklar ile enerji akışının optimize edilmesi, bölgesel talebin karşılanması ve enerji sürekliliğini sağlanmaktadır.

Güç sistemlerinde artan güç ihtiyacı, elektrik üretimindeki yeni teknolojik ilerlemeler, yenilenebilir ve alternatif kaynakların kullanımının tercih edilmesi, güç sistemlerinin genişletilmesindeki zorluklar kaynak seçimi ve konumlarının belirlenmesinde karmaşık problemler ortaya çıkarmaktadır [13]. Karmaşık problemlerin çözümleri analitik yöntemler, metasezgisel yöntemler ve matematiksel programlama yöntemleri gibi sınıflandırmaya ayrılabilir . Bu sınıflandırma kapsamında yapılan çalışmalarda metasezgisel tekniklerin, klasik matematiksel programlama tekniklerine göre önemli avantajlara sahip olduğu belirtilmektedir [14]. Güç sisteminde kararlılığın sağlanması için kaynak boyutlarının belirlenmesi, ağ parametrelerinin ve durumunun incelenmesi birçok problemi beraberinde getirmektedir [15].

Metasezgisel algoritmalar, kaynaklarının yer tayini ve boyutlandırması gibi karmaşık problemleri çözmek için kullanılan etkili araçlardır. Bu algoritmalar, optimizasyon problemlerini çözmek ve en iyi çözümleri bulmak için kullanılan yapay zekâ tabanlı tekniklerdir. Optimizasyon, ele alınan bir problemde mükemmel çözümü bulmak için stratejiler ve yaklaşımları araştıran bir matematik ve bilgisayar biliminin disiplinler arası çalışmasının ürünüdür. Bir problemlerin çözümü, tamsayılar veya gerçek değerler olabilen bağımlı optimizasyon değişkenlerini kullanarak bir veya birden fazla amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize etmeyi içermektedir [16]. Mühendislik, ekonomi, lojistik, tıp ve diğer disiplinlerde bir problemin çözümünde karar verme için optimizasyon algoritmalarını kullanabilir. Doğrusal programlama (Linear Programming-LP) [17], doğrusal olmayan programlama (NonLinear Programming-NLP) ve dinamik programlama (Dynamic Programming-DP) [18] dahil olmak üzere geleneksel optimizasyon yöntemleri, çoklu optimizasyon konularını ele almaktadır. Bu geleneksel optimizasyon algoritmaların, zaman açısından verimli olmaları ve yerel optimumlara yakınsama sağlamaları gibi çeşitli avantajları olmakla beraber, bu optimizasyon yöntemleri, yerel çözümlerden kaçma, sapma olasılığı, karmaşık işleme kısıtlamaları, birinci veya ikinci dereceden türevlerin hesaplanmasındaki hesaplama zorlukları gibi önemli sorunlardan muzdariptir [19].

Metasezgisel algoritmalar ise, geleneksel optimizasyon algoritmalarında meydana gelen sorunlara yol açmadan problemleri çözebilir. Geleneksel algoritmaların aksine, meta-sezgisel algoritmalar genellikle deneysel olarak esinlenen teorik temellere dayanır ve doğal olaylardan veya canlıların davranışlarından ilham almaktadırlar [20,21]. Metasezgisel algoritmalar bir güç sitemi problemini çözmek için üç algoritmayı birleştirmek gibi, soruna uyacak şekilde ayarlanabilen, birleştirilebilen veya değiştirilebilen esnek algoritmalardır [22]. Bu algoritmalar, yüksek boyutlu arama alanlarını stokastik olarak keşfederek sağlamlık ve küresel arama kapasitesi avantajları sunar. Fakat stokastik davranışları, başarılı bir optimal çözüm seçimini garanti edemez [23]. Bu algoritmalar sağlık sektöründe [24,25], endüstri uygulamalarında [26,27] ve kimyasal uygulamalar [28,29] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Güç sistemlerinde performansın arttırılması, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden biridir. Bu nedenle, güç sistemleri, yeni enerji kaynaklarının geniş ölçekte benimsenmesi ve modern bilgi işlem teknolojilerinin kapsamlı bir şekilde dahil edilmesiyle birlikte hızla gelişmektedir [30]. Akıllı şebeke teknolojilerinin güç sistemlerine entegre edilmesi, tüketicileri puant saatlerinde kullanma alışkanlıklarını değiştirmeye teşvik eden arz-talep programları ile elektriğin daha verimli kullanılmasını sağlar ve çevresel sürdürülebilirliği de desteklemektedir [31]. Ancak bu güç sistemlerinin işletiminde ve kontrolünde zorluklara yol açmaktadır [32]. Bu gibi çeşitli güç optimizasyonun sorunlarının üstesinden gelmek için etkili optimizasyon tekniklerine ihtiyaç vardır. Öte yandan, belirli bir performans derecesine ulaşmak için çeşitli kısıtlamalar dahil olmak üzere bir güç sisteminin optimize edilmesi için, problem formülasyonu da dikkate alınmalıdır. Burada, her kısıtlama, optimize edicinin sistem davranışını işlerken daha verimli olmasına yardımcı olur. Her sistem bileşeni için fiziksel özellikler ve mevcut bilgiler, sistem öğelerini belirler. Kısıtlamalar, bileşenlerin kapasitesine, erişilebilirliğine ve maliyetine bağlı olabilir. Bu kısıtlamalar sistem güvenilirliğini ve kararlılığı sağlar. Optimizasyon algoritmaları, tüm sistem kısıtlamalarını karşılarken, üretim ve talepteki belirsizliklere karşı güç sisteminin performansını artırmak için gereklidir [33]. Güç sistemlerindeki sorunlar, düzensiz yenilenebilir kaynakların getirdiği belirsizlikler ve değişken elektrik talebi de dahil olmak üzere bir dizi sorun nedeniyle deterministik kontrol ve yönetim sistemleri ile verimli bir şekilde çözülemez [34]. Deterministik algoritmaları geliştirmek için makine öğrenimi teorilerini ve teknikleri kullanmak daha iyi performans sağlayabilir [35,36]. Fakat bu durum karmaşıklığı artırmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, güç sistemleri alanındaki çoklu problemleri

çözmek için kullanılabilmektedir. Ayrıca, güç sistemleri sorunlarını çözmek için bu algoritmaları kullanmak, çok çeşitli ve zor problemlerde karmaşıklığı gidermesi nedeniyle güç sistemleri üzerine çalışan araştırmacılar arasında giderek daha çekici hale gelmektedir [37].

Güç sistemlerinin parametre tanımlamasını geliştirmek için metasezgisel optimizasyon algoritmalarının uygulanmasına ilişkin çalışmalara bakıldığında, PV sistemlerinin, Li-ion pillerin ve yakıt hücrelerinin parametrelerinin çıkarılmasında metasezgisel algoritmaların kullanıldığı görülmüştür [38]. Mikro şebeke işletilmesi ve yönetiminde birçok probleme çözüm sunulmasında metasezgisel algoritmaların rolü artmaktadır [39].

Güç sistemlerinin analizinde temel olarak doğrudan yöntemler ve dolaylı yöntemler olmak üzere iki yaklaşım vardır [40]. Güç sistemlerinde güç akış hesaplamaları yaygın olarak kullanılmakla beraber dinamik model analizleri de yapılmaktadır [41,42]. Dinamik sistemlerde hesaplamalar oldukça fazla olmasına rağmen gerilim kararlılığı için güç akış hesaplamaları kullanılmaktadır [43]. Ayrıca 9,14,39 gibi farklı sayılarda IEEE bara test sistemleri için Newton-Raphson ve Gauss Seidel metotları kullanılarak gerilim genlikleri ve açı değerleri göz önünde bulundurularak güç akış hesaplamaları yapılmıştır [44]. Diğer benzer çalışmalarda genel olarak farklı metotlar tercih edilmiş ve kullanılan bu metotların iterasyon süreleri, limitleri ve sayıları karşılaştırmaları yapılmıştır [45]. Bara veya hatlara bağlı olan donanımlarda gerilim kararlılık indekslerini tespit eden yaklaşımlarda bulunmaktadır. Güç sistemi baralarının çalışma esnasındaki davranışları gerilim kararlılık indeksleri ile bulunabilir [46]. Bu çalışmalarda görülen metotlar ve analizlerle ortaya çıkan sonuçlar karmaşık çok kapsamlı işlemlerdir. Bu tür karmaşıklıklarla başa çıkmak için metasezgisel optimizasyon algoritmaları önemli bir rol oynamaktadır. Bu algoritmalar, genellikle geniş çözüm alanlarını keşfetmekle birlikte karmaşık optimizasyon problemlerini etkin bir şekilde ele almaktadır. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, bu karmaşıklığı yönetmek ve genellikle tüm çözüm alanını keşfetmek için kullanılmaktadır.

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, doğada gözlenen davranışlardan ve sosyal organizasyonlardan esinlenerek tasarlanmış çeşitli optimizasyon tekniklerini içerir. Bu algoritmalar, genellikle karmaşık, çok boyutlu ve doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Yeni enerji kaynaklarının yer tayini ve boyutlandırması çok yönlü karmaşık problemlerin çözüm arayışında metasezgisel

algoritmalar kullanırken, doğru algoritmanın seçilmesi ve parametrelerin ayarlanması önemlidir. Yaygın olarak kullanılan optimizasyon algoritmaları incelendiğinde Genetik Algoritma (GA) doğal seleksiyon ve genetik çaprazlama prensiplerine dayanır. Bu algoritma, olası çözümleri bir genetik süreçte evrimleştirerek en uygun çözümü bulmaya çalışır. Genetik algoritmalar, genellikle karmaşık optimizasyon problemlerinde kullanılır [47]. Parçacık sürü optimizasyon algoritmaları (PSO), parçacıkların belirli bir hedef fonksiyonu optimize etmek için bir araya gelerek hareket ettiği bir optimizasyon tekniğidir. Bu parçacıklar, en iyi çözümü belirlemek için birbirleriyle etkileşime girer. PSO, özellikle çok boyutlu ve doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinde etkili olabilir[48]. Benzetilmiş Tavlama Algoritmaları (BTA), fiziksel sistemlerin termodinamik davranışlarından esinlenmiştir. Bu algoritma, çözüm alanında rastgele keşifler yapar ve belirli bir süreçte daha iyi çözümlere doğru yavaş yavaş hareket eder. BTA, genellikle karmaşık ve değişken optimizasyon problemlerinde kullanılır [49]. Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritmaları (KKA), karıncaların yiyecek kaynaklarını bulmak için izlediği iz yolunu taklit eder. Bu algoritma, iz bırakma ve iz takip etme mekanizmalarını kullanarak çözüm alanında optimal yolları bulmaya çalışır. KKA, genellikle kısa yol problemleri ve optimal rota bulma problemleri için kullanılır [50]. Bozkurt Optimizasyon Algoritması (BOA), doğada bozkurt sürülerinin sosyal davranışlarını taklit eder. Bu algoritma, liderlik hiyerarşisi ve sosyal etkileşimlerin bir kombinasyonunu kullanarak çözüm alanında optimal çözümleri arar. BOA, özellikle karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemleri için etkili olabilir [51].

Bu optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonlarının ve kısıtlarının doğru bir şekilde modellenmesine, başlangıç popülasyonunun çeşitliliğine, kısıtların işleme yöntemlerine ve performans analizi gibi faktörlere dikkat etmek önemlidir. Ayrıca, algoritmanın çalışması için yeterli işlem gücü ve hesaplama kaynaklarına da ihtiyaç duyulabilir. Bu nedenle, doğru algoritmanın seçimi ve uygun parametre ayarları, yer tayini ve boyutlandırma problemlerinin etkili bir şekilde çözülmesinde kritik öneme sahiptir.

Daha önce belirtildiği üzere güç sistemleri çok boyutlu ve karmaşık optimizasyon problemleri içermektedir. Bozkurt optimizasyon algoritması karmaşık fonksiyonlar ve çok boyutlu problemler üzerinde etkili bir şekilde çalışmaktadır. Diğer optimizasyon algoritmalarına nazaran çözüm arayışında hızlı bir şekilde yakınsama göstermektedir. Bu özelliği, güç sistemlerindeki karmaşık optimizasyon problemlerinin hızlı ve etkili bir şekilde

çözümünü kolaylaştırmaktadır. Doğrusal olmayan güç sistemi problemleri için popülasyon tabanlı bir yaklaşım benimseyerek birden fazla çözüm adayıyla daha kapsamlı bir çözüm alanı keşfetme olanağı sağlayabilmektedir. Güç sistemleri problemlerinin çeşitliliği ve karmaşıklığı göz önüne alındığında ise Bozkurt Optimizasyon Algoritması farklı tipteki problemler için uygun bir çözüm sunabileceği düşünülebilir. Bu algoritma diğer bazı optimizasyon algoritmalarına kıyasla daha az sayıda ayarlanabilir parametreye sahip olabilir. Bu da algoritmanın uygulanmasını basitleştirmektedir.

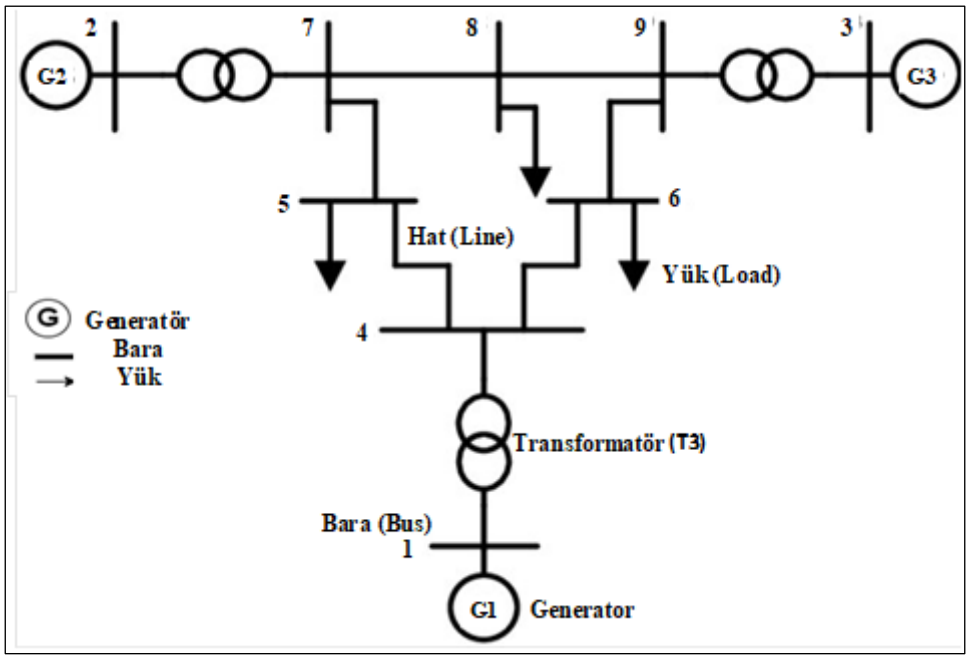
Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde artan yük talepleri neticesinde ortaya çıkacak; hatlarda aşırı yüklenme sorunları, bara gerilimlerindeki değişimler ve mevcut üretim kaynaklarının aşırı yüklenmesi gibi kararlılık problemleri incelenmiştir. Ortaya çıkan kararlılık sorunlarının çözümünde sisteme eklenecek yeni kaynaklar ile çok sayıda farklı çözümler Python dilinde yazılmış Scriptler ile otomatik olarak oluşturulmuştur ve çözüm önerileri listelenmiştir. Bu çözümler içerisinden kaynak boyutu ve konumu, hat parametreleri, generatör parametreleri ve bara parametreleri göz önünde bulundurularak bulunan çözümlerin içerisinden en optimum çözüm, Bozkurt Optimizasyon Algoritması kullanılarak belirlenmiş ve benzetim ortamında doğrulaması yapılmıştır. DIgSILENT PowerFactory benzetim ortamında elde edilen sonuçlar, hat yüklenmesi, generatör yüklenmesi, bara gerilim düşümü ve yükselmeleri gibi olumsuz etkilerin başarılı bir şekilde giderilebileceğini göstermiştir.

2. GÜÇ SİSTEMLERİ VE BİLEŞENLERİ

Güç sistemleri, elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım birimlerini barındıran karmaşık ağlardır. Temel olarak, elektrik enerjisinin güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde tüm tüketici noktalarına iletilmesi güç sistemleriyle sağlanır. Elektrik enerjisinin doğru kaynaklardan üretimi, kaynakların yer tayini ve güç sistemlerinin optimizasyonu, sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji altyapısı sağlamak için önemlidir. Bu nedenle, enerji talebini karşılamak, çevresel etkileri azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve enerji kaynaklarını en etkin şekilde kullanmak için çeşitli stratejilerin ve teknolojilerin uygulanması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Güç sistemlerinin etkili bir şekilde işlemesi, enerji üretiminin ve dağıtımının optimize edilmesiyle mümkün olmaktadır. Dolayısıyla, güç sistemlerinde enerji kaynaklarının verimli kullanımını, iletim hatlarının kapasite ve güvenilirliğini, enerji talebinin yönetimini ve sistem operasyonunun yapılması en önemli unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır.

2.1. Güç Sistemlerinde Fiziksel Bileşenler

Bir güç sistemi genel olarak üretim birimleri, üretilen gücü diğer bölgelere taşıyan iletim hatları/ağları ile yüklerden ve son kullanıcılardan meydana gelmektedir. Güç sistemi bileşenleri Şekil 2.1'deki 9 baralı bir güç sistemi örneği üzerinde verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, üretim birimleri (G-Generatörler, yenilenebilir enerji kaynakları), transformatörler (T3), iletim hatları (Line), yükler (Load) ve baralardan (Bus) güç sistemini meydana getirmektedir. Güç sistemlerinin analizini ve planlamasını yapmak için sistem bileşenlerinin özellikleri ve türlerinin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 2.1. 9 Baralı bir güç sistemi

2.1.1. Üretim birimleri

Tüm güç sistemleri bir veya daha fazla üretim birimine sahiptir. Bir güç sisteminde doğru akım (DA) gücü bataryalar, yakıt hücreleri veya fotovoltaik hücreler tarafından sağlanabilirken alternatif akım (AA) gücü tipik olarak generatörlerle elde edilmektedir. Bu generatörlerde rotoru döndürmek için fosil yakıt (kömür, gaz ve petrol dahil) kullanılarak ısıtılan aşırı ısıtılmış buhardan suyun kendisine (hidroelektrik güç) ve rüzgâra (rüzgâr gücü) kadar çok çeşitli teknikler kullanılmıştır. Nükleer santrallerde tipik olarak nükleer reaksiyon kullanılarak suyun ısıtılması ve buhar türbinin döndürülmesi prensibine dayanmaktadır. Generatör kutuplarının sayısı ile birlikte rotorun dönme hızı, generatör tarafından üretilen gerilimin frekansını belirler. Sistemdeki tüm generatörler eşzamanlı olarak döner ve belirli bir frekansı hedefleyecektir; Çin ve Avrupa ülkelerinde bu 50 Hz ve Amerika Birleşik Devletleri'nde 60 Hz'dir.

Güç sistemlerindeki üretim birimleri, çeşitli enerji kaynaklarını kullanarak çevreye duyarlı ve sürdürülebilir elektrik üretimine olanak sağlar. Bu birimlerin kombinasyonu, enerji talepleri ve coğrafi koşullara bağlı olarak farklılık gösterebilir. Güç sistemleri, güvenli, istikrarlı ve kesintisiz bir elektrik arzı sağlamak için bu üretim birimlerini uyumlu bir şekilde çalıştırmak ve yönetmek için tasarlanır. Güç sistemlerine eklenecek generatörlerin veya yenilenebilir enerji kaynakların seçiminde öncelik belirli bir bölgede kullanılabilir

yenilenebilir enerji kaynaklarının belirlenmesidir. Bu, rüzgâr haritalarının analizi, güneş radyasyonu haritaları, hidrolojik veriler, biyokütle kaynaklarının potansiyeli veya jeotermal potansiyelin değerlendirilmesi gibi çalışmaları içerir. Belirlenen potansiyel kaynaklar, teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilir. Bu değerlendirme, enerji üretimi için en uygun teknolojileri, projenin ölçeğini, yatırım maliyetlerini, işletme ve bakım maliyetlerini, enerji verimliliğini ve enerji çıktısını içerir. Bu aşamada, projenin sürdürülebilirliği ve ekonomik getirisi analiz edilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemine entegre edilmesi, enerji üretimini ve iletimini destekleyecek şekilde planlama ve tasarım gerektirir. Yenilenebilir enerji projeleri, enerji üretim kapasitesi ve enerji talepleri dikkate alınarak güç sistemi planlamasına dahil edilmelidir. Entegrasyon, güç akışı analizi, güç faktörü düzenlemesi, frekans ve gerilim kontrolü, iletim hatları ve dağıtım ağları gibi faktörleri içerir.

2.1.2. Transformatör

Transformatör, elektrik enerjisini bir devreden diğerine iletmek için kullanılan elektromanyetik bir cihazdır. İki veya daha fazla sargıdan oluşan bir çekirdek üzerine sarılan tellerden oluşur. Bu sargılar genellikle primer ve sekonder sargı olarak adlandırılır. Birinci veya birincil sargıdaki değişen bir akım, transformatörün çekirdeğinde değişen bir manyetik akı ve dolayısıyla ikincil sargı boyunca değişen bir manyetik alan oluşturur. Bu değişken manyetik alan, ikincil sargıda değişken bir elektromotor kuvveti (EMK) veya "gerilim" indükler. Bu etkiye karşılıklı indüksiyon denir. Transformatörler, elektrik enerjisinin güvenli ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlayan temel bileşenlerdir. Elektrik enerjisini bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine dönüştürmek veya aynı gerilim seviyesinde iletmek için kullanılır

Güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar ve enerji dağıtımı, enerji iletimi ve endüstriyel uygulamalar gibi birçok alanda önemli bir rol oynarlar. Transformatörler, voltaj ve akım seviyelerini değiştirmek için verimli bir araç sağlar ve toplu güç iletim sistemini pratik hale getirir. Transformatörde giriş sargısı primer ve çıkış sargısı sekonder olarak adlandırılmaktadır. İdeal bir transformatörde, primer sargı sayısının (Np) sekonder sargı sayısına (Ns) oranı, primer gerilimin (Vp) sekonder geriliminin (Vs) oranına eşittir ve dönüştürme oranını (k) verir. Buna göre Eş. 2.1’de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = k \tag{2.1}$$

Transformatörler, güç sistemlerinde temel bir role sahip olan elektriksel cihazlardır. Bunlar, AA (alternatif akım) elektrik enerjisini bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine dönüştürmek için kullanılır. Transformatörlerin güç sisteminde kullanım amaçları şu şekilde açıklanabilir:

Gerilim Dönüşümü: Transformatörler, güç sistemindeki farklı gerilim seviyeleri arasında gerilim dönüşümü sağlar. Yüksek gerilimli iletim hatları, enerjiyi uzun mesafeler boyunca taşımak için kullanılırken, daha düşük gerilim seviyeleri, dağıtım hatları aracılığıyla tüketici noktalara iletilir. Transformatörler, bu farklı gerilim seviyelerini uygun bir şekilde dönüştürerek enerjinin kayıpsız ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlar.

İzolasyon ve Güvenlik: Transformatörler, yüksek gerilimli iletim hatlarından düşük gerilimli dağıtım hatlarına enerji aktarırken izolasyon sağlar. Bu, elektriksel tehlikelerin ve arızaların önlenmesine yardımcı olur ve güvenlik açısından önemli bir rol oynar.

Bu amaçlara ek olarak güç sistemlerinde kullanılan transformatörler kullanım yerlerine göre aşağıdaki gibi çeşitlendirilebilir:

Dağıtım Transformatörleri: Bu tür transformatörler, iletim hatlarından alınan yüksek gerilimli elektriği düşük gerilimli dağıtım hatlarına dönüştürmek için kullanılır. Şehirlerdeki dağıtım trafoları olarak bilinirler.

Güç Transformatörleri: Güç transformatörleri, yüksek güç uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Elektrik santralleri ve endüstriyel tesislerde, yüksek güç seviyelerini dönüştürmek için kullanılırlar.

Güç Dağıtım Transformatörleri: Güç dağıtım transformatörleri, yüksek gerilimli iletim hatlarından alınan elektriği, düşük gerilimli dağıtım hatlarına ve son kullanıcıların tesislerine dönüştürmek için kullanılır.

Oto Transformatörleri: Enerji iletim ve dağıtım merkezlerinde kullanılır. Farklı gerilim seviyeleri arasında enerji aktarımını sağlarlar.

2.1.3. İletim hattı

İletim hatları, elektrik enerjisinin üretim noktalarından dağıtım noktalarına taşınmasını sağlayan bileşenlerdir. Bu hatlar, genellikle yüksek gerilim seviyelerinde çalışır ve enerji kayıplarını minimize etmek ve iletim mesafelerini artırmak için kullanılır. İletim hatları, uzun mesafeler boyunca uzanır ve genellikle yüksek alternatif gerilim veya yüksek doğru gerilim kullanılarak iletim yaparlar. İletim hatları, transformatörler ve dağıtım hatlarıyla bağlantı kurarak elektrik enerjisini enerji şebekesinin farklı noktalarına iletebilir. İletim hatları, güç sistemlerinin güvenilirliği, verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından büyük öneme sahiptir. Elektrik enerjisinin iletimi sırasında iletim hatlarındaki enerji kayıpları minimize edilmeye çalışılır çünkü enerji kayıpları, çevresel etkiler ve maliyetler açısından olumsuz sonuçlar doğurabilir. İletim hatları, güç sistemlerindeki gerilim düşüşlerini minimize etmek, enerji dengesini korumak ve güç sistemlerinin kararlılığını sağlamak için tasarlanır. Ayrıca, iletim hatları üzerindeki koruma sistemleri, aşırı yüklenme, kısa devre, yıldırım darbeleri ve diğer arıza durumlarına karşı hatların korunmasını sağlar. İletim hatları, güç sistemlerinin geniş alanlarda enerji iletimini mümkün kılarak, enerji tüketim merkezlerine güvenilir elektrik sağlar ve son noktada enerji ihtiyaçlarını karşılar. İletim hatlarında kullanılan iletkenler genellikle alüminyumdan yapılır (düz veya çelikle güçlendirilmiş veya bazen kompozit malzemeler), ancak bazı bakır teller müşteri tesislerine orta gerilim dağıtımında ve alçak gerilim bağlantılarında kullanılır. Güç sistemlerinde iletim hatlarının önemi ve görevleri aşağıdaki başlıklarla özetlenebilir.

Enerji Taşıma: İletim hatları, elektrik enerjisini üretim merkezlerinden tüketim bölgelerine taşır. Güç üretim tesisleri genellikle nispeten uzak bölgelerde konumlanabilir, ancak tüketim merkezleri yoğun olarak nüfus edilmiş alanlarda bulunabilir. İletim hatları, bu uzaklık nedeniyle enerjinin uzun mesafelerde taşınmasına olanak tanır.

Güç Kaybı Minimizasyonu: İletim hatları, yüksek gerilim seviyelerinde çalıştıklarından, elektrik enerjisi taşımak için daha az akım gerektirirler. Daha düşük akım, enerji kaybının azaltılmasına yardımcı olur. Ohm'un yasasına göre, enerji kaybı akımın karesiyle doğru

orantılıdır. Yüksek gerilimde düşük akım kullanıldığında, enerji kaybı daha az olur ve güç sistemlerinin verimliliği artar.

Yük Dengesi ve Güvenlik: İletim hatları, farklı bölgelerdeki enerji taleplerini dengeleyerek enerji arzının sürekli ve istikrarlı olmasını sağlar. Ayrıca, güç sistemlerinin kritik parçaları oldukları için güvenlik ve süreklilik açısından büyük öneme sahiptirler. İletim hatlarındaki arızalar veya kesintiler, geniş alanlarda enerji kaybına ve aksaklıklara yol açabilir.

2.1.4. Bara

Güç sistemlerinde bara, sistem bileşenlerinin bir araya getirildiği ve dağıtıldığı noktalardır. Güç sistemlerinde, birden fazla üretim kaynağı ve yükler arsında güç akışı için kesişim ve iletim terminalleridir. Baraların çalışma gerilimi, belirli bir güç sistemi veya alt sistemde kullanılan gerilim seviyelerine bağlı olarak değişebilir. Elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan çalışma gerilim seviyeleri şu şekildedir:

Yüksek Gerilim (YG): Genellikle 1 kV ile 69 kV arasındadır. Yüksek gerilim seviyesi, enerjinin iletimi ve uzun mesafelere taşınması için kullanılır.

Orta Gerilim (OG): Genellikle 1 kV ile 33 kV arasındadır. Orta gerilim, iletim ve dağıtım alt sistemlerinde kullanılır.

Düşük Gerilim (DG): Genellikle 1 kV'den daha düşüktür. Düşük gerilim seviyesi, son kullanıcılar için evler, işyerleri ve endüstriyel tesislerde kullanılır.

Bu gerilim seviyeleri, elektrik güç sisteminin tasarımı ve işletilmesi için belirli standartlara ve regülasyonlara tabidir. Her gerilim seviyesi, belirli uygulama alanlarına ve güvenlik gereksinimlerine sahiptir. Ayrıca bara çalışma gerilimi, güç sistemi tasarımının güç iletimi ve kararlılık üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

2.1.5. Yük

Güç sistemlerinde yük, elektrik enerjisi tüketen cihazlar, ekipmanlar ve tesisler olarak tanımlanır. Yükler, güç sistemlerinin tasarımı, planlaması ve işletimi sırasında gerilim

kararlılığı ve verimi direkt etkileyen bileşenlerdir. Yükler, genellikle farklı güç faktörlerine, farklı gerilim seviyelerine ve farklı çalışma karakteristiklerine sahip olabilir. Örneğin, endüstriyel tesisler, aydınlatma sistemleri, evsel kullanım için elektrikli cihazlar gibi çeşitli yük tipleri mevcuttur. Yüklerin doğru bir şekilde belirlenmesi ve analizi, güç sisteminin kapasitesini ve güvenilirliğini sağlamak için önemlidir.

Yük analizi, güç sistemlerinde yüklerin özelliklerini ve davranışlarını anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, yüklerin güç taleplerini, frekans tepkilerini, dalgalanmalarını ve güç faktörlerini değerlendirir. Yük analizi, güç sisteminin planlanması ve genişletilmesi, güç kaynaklarının boyutlandırılması, transformatör seçimi ve kapasite hesaplamaları gibi birçok mühendislik kararı için temel bilgiler sağlar. Yük analizi, mevcut yük profillerini anlamak ve gelecekteki yük büyümesini tahmin etmek için kullanılır. Yükler, iletim sistemi (veya şebeke) aracılığıyla üretim birimleri gibi enerji kaynakları tarafından sağlanır. Zaman içinde güç sistemi yükündeki değişim yani, tüketilen güçteki veya şebekedeki akımdaki zamanın bir fonksiyonu olarak değişim, yük eğrisi olarak adlandırılır. Kullanıcıların anma gücüne göre belirlenen yükler, belirli bir olasılıkla çeşitli değerler alabilen rastgele niceliklerdir. Tek bir yükün, bir yük grubunun veya tüm sistemin gerçek gücü P ile ifade edilir ve Eş.2.3'teki gibi hesaplanır.

$$\mathrm{P} = \mathrm{S}.\cos\Phi \tag{2.3}$$

Burada S görünür güç, cos ϕ ise güç faktörüdür. Görünür güç ve güç faktörü ise sırasıyla Eş.2.4 ve Eş.2.5 ile bulunur.

$$\mathrm{S} = \mathrm{V}.\mathrm{I} \tag{2.4}$$

$$\Phi = \arctan\frac{\mathrm{Q}}{P} \tag{2.5}$$

Güç sistemlerindeki farklı yük profilleri, güç sistemi planlaması ve kapasite yönetimi için önemlidir. Yükler, elektrik enerjisinin tüketildiği noktalardır. Evlerde, iş yerlerinde, endüstriyel tesislerde ve diğer tüketim bölgelerindeki cihazlar ve ekipmanlar, elektrik enerjisi kullanarak farklı profiller oluşturur. Yüklerin tüketim alışkanlıkları, talep tahminleri ve enerji tüketimi trendleri, güç sistemlerinin gelecekteki ihtiyaçlarını belirlemek ve

kaynakların etkin kullanımını planlamak için kritik veriler sunmaktadır. Güç üretiminin talep edilen enerji miktarı ile dengelenmesi için yükler iyi analiz edilmeli ve elektrik enerjisi sürekli olarak değişen taleplere göre ayarlanmalıdır. Yüklerin düzenlenmesi ve dengeleme, enerji arzının sürekliliği ve güvenilirliği açısından önem arz etmektedir.

2.2. Güç Sistemlerinin Temel Özellikleri

Elektrik gücü, enerjideki artış veya azalmanın zamana oranı ile ölçülebilir bir niceliktir. Güç aynı zamanda iki niceliğin (akım ve gerilim) matematiksel ifadesi ile açıklanabilir. Bu iki nicelik zamana göre değişebilir (alternatif akım) veya sabit seviyelerde tutulabilir (doğru akım). Bir güç sisteminde devrenin bir bileşeni tarafından sağlanan veya tüketilen anlık güç Eş. 2.6 ile gibi ifade edilebilir.

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dQ}} = \frac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{V}.\mathrm{I} \tag{2.6}$$

Herhangi bir anda bir kaynak tarafından üretilen veya tüketilen güç (P), akım (I) ve gerilimin (V) çarpılmasıyla bulunur. Güç devreleri Kirchhoff'un akımlar ve gerilimler kanununa göre ifade edilebilir. Kirchhoff'un akımlar kanununa göre; bir düğüm noktasında gelen akımların toplamı bu düğüm noktasından çıkan akımların toplamına eşittir.

$$\sum_{b\to n} I_b = 0 \tag{2.7}$$

Eş. 2.7 de verilen Kirchhoff'un akımlar kanunu ifade eden eşitlikte *b* devredeki düğümü, *n* ise düğüm noktasından ayrılan kolları ifade etmektedir. b→n ifadesi *b* noktasından gelen akımların *n* kadar kola ayrıldığı anlamına gelmektedir. Kirchhoff'un gerilimler kanununa göre ise kapalı bir devrede kaynak gerilimi ve elemanlar üzerine düşen gerilime eşittir. Başka bir ifade ile bir devredeki herhangi bir kapalı döngü etrafındaki tüm gerilimlerin cebirsel toplamının sıfıra eşit olduğunu verir.

$$\sum_{k\epsilon l} V_k = 0 \tag{2.8}$$

Eş. 2.8'de verilen denklemde *l* (loop) kapalı bir devredir (veya döngü) *k*, *l* döngüsündeki dallardan biridir. "k ∈ l" sembolü, *k* dalının *l* döngüsüne ait olduğu anlamına gelir.

Bir güç sistemi içindeki belirli bir durumda güç dağılımını anlamak için bu bölümde verilen eşitliklerden yararlanılarak güç akış analizi yapılmaktadır. Bu analiz, bir güç sistemindeki gerilimin ve akımın, aktif güç tüketimiyle ilgili bileşenlerin bilinen veya tahmin edilen değerleri temel alarak nasıl dağıldığını gösterir. Burada, üretim kaynakları, yükler, transformatörler, iletim hatları, baralar gibi donanımlar ile gerilimler ve akımlar gibi parametreler için başlangıç koşulları belirlenir. Bu başlangıç koşulları analizin temel referans noktalarını oluşturmaktadır. Kirchhoff'un gerilim kanunu ve akım kanununa dayanan denklemler kullanılarak, güç akışı denklemleri oluşturulur. Bu denklemler, sistemin çeşitli noktalarındaki gerilim ve akım değerleri arasındaki ilişkileri tanımlamaktadır ve modelleme yapılırken bu akış göz önünde bulundurulmalıdır.

3. GÜÇ SİSTEMLERİNİN PLANLANMASI

Bir güç sitemde kurulu kapasitesi ile birlikte ihtiyaç olan gücün artmasıyla, yeni hatların, trafo merkezlerinin ve üretim kaynaklarının hangi seviyede veya hangi bölgelere eklenmesi gerektiğini belirlemek kararlı çalışmayı sürdürmek açısından temel unsurlardır. Bir güç sistemi planlanırken, maliyetin dikkate alınmasına ek olarak, elde edilecek optimum tasarım, elektrik enerjisinin güvenliği ve sürekliliği açısından oldukça tatmin edici hizmet kalitesi göstergelerine sahip olmalıdır. Güç sistemi tasarımı ve planlamasında güç talepleri, kapasitesi ve kabul edilebilir seviyeler belirlenmelidir. Bu gibi parametreleri belirlemek için iki farklı yöntem kullanılmaktadır [52].

- Matematiksel programlama yöntemleri
- Sezgisel yöntemler

Güç sistemlerinin üretim ihtiyacının artmasıyla planlamalara yönelik çalışmaların ana odağında deterministik yaklaşım vardır. Ancak olası riskler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme dâhil edilmesi, davranışlarındaki belirsizlikler hala iyileştirilmesi gereken konulardandır. Gelecekte güç ihtiyacının artması, yeni üretimin kaynaklarının daha fazla yaygınlaşması muhtemel olacağından, riskler ve belirsizliklerle verimli bir şekilde çalışacak araçlar aramaya başlamak ve bu şekilde planlamalar yapmak gerekmektedir [53]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr generatörleri, fotovoltaik sistemler gibi meteorolojik ve coğrafi konumları nedeniyle rastgelelik sunar. Ancak sadece yenilenebilir enerji kaynakları değil, aynı zamanda gelecekteki yakıt maliyetleri, endüstri talebi ve elektrik şebekelerinde kullanılan farklı malzeme ve ekipmanlarla ilgili tüm maliyetler de belirsizlik arz etmektedir [54, 55].

3.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Planlama Yöntemleri

Güç sistemleri genişleme planlaması sorununu ayrı ayrı formüle etmek için birden fazla objektif fonksiyonla çözmek için farklı optimizasyon yöntemleri mevcuttur. Bu optimizasyon çalışmalarında, maliyet, hat uzunluğu, üretim miktarları gibi kısıtlar belirlenerek çözüm üretilmeye çalışılmıştır [56, 57]. Güç sistemlerinin planlanmasında, üretim merkezlerinin yerini, boyutunu ve hizmet alanını planlama problemi analiz edilir. Formüle edilen problem, uzantıların uzunluklarıyla doğrudan ilişkili maliyetlerin doğrusal

bir fonksiyonunu dikkate alırlar ve algoritma ile uygun çözümler sunulur [52]. Çözümü planlanan güç sistemi modelinde, büyük boyutlu problemlerin çözülmesi mümkündür fakat iletim hatlarının güç taşıma kapasitesi kısıtlamaları vardır. Bu durumda güç sisteminin teknik kısıtlamalarına bağlı olarak optimizasyon problemi oluşur ve çözümü için tamsayılı karma doğrusal programlama teknikleri kullanılabilir [58]. Yalnızca operasyonel çalışma kısıtlamalarının dikkate alınmadığı, aynı zamanda sistemdeki generatörlerin konumu ve optimize edilmiş boyutlandırmasının yapıldığı bir model tasarlanmalıdır [59].

3.2. Üretim Kaynaklarında Optimal Planlama Modelleri

Güç sistemlerinde kaynakların yer tayini ve planlamalar yapılırken, çevresel ve teknik yönleri dikkate alarak, maliyet ve teknolojik yeniliklerin etkisi altında ortaya çıkan riskleri ve belirsizlikleri göz önüne alarak sistemi optimize edebiliriz [60, 61]. Ayrıca, maliyetlerinin değerlendirilmesi ve en aza indirilmesi amacıyla farklı üretim yöntemleri sunulmaktadır. Sistemin optimize edilmesi için kullanılan araçlar, yazılımlar ve algoritmalar ile uzun vadede uygun maliyetli bir entegrasyonun sağlanması hedeflemektedir [62].

Güç sistemlerinin planlamaları mevcut ve uzun vadede ortaya çıkacak ihtiyaçlara dayanmaktadır. Sistemin planlanması ve işletilmesinde teknik kısıtlamaların yanı sıra, kaynak, trafo merkezleri, coğrafi kısıtlamalar, tüketim arzı ve yük, kullanılacak maksimum ekipman miktarı, normal çalışma limitleri ile birlikte kısa devre akımları da dikkate alınmaktadır. Bu planlamaların amacı, güç kayıplarını azaltmanın yanında maliyetleri de aza indirmektir. Bu gibi problemlerin kararlı çözümünde iki aşamalı bir yöntem izlenebilir. İlk aşamada problem çözümünde bir algoritma ile çözüm üretilir ve daha sonra bu çözüme dayalı bir yöntem geliştirilir [63]. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda farklı yaklaşımlar ve optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Optimum akış modeline dayalı bir metodoloji olan Doğrusal programlama ile optimizasyon süreci, güç santrallerinin çevresel ve ekonomik etkileri azaltmak için kullanılmaktadır [64] . Kaynak boyutları ve yerleri genellikle planlama esnasında tanımlanır. Amaç fonksiyonu, seçilen bir zaman ufku boyunca enerji maliyetini en aza indirmektir [65]. Güç sistemi modelinin kısıtlamaları, ihtiyaç duyulan gücün en yüksek güç talebini karşılamalıdır. Yıllık enerji üretiminin aşılmaması için de her üretim kaynağının sınırları dikkate alınmalıdır. Her bir üretim kaynağının seviyesi, tüm güç sisteminin kararlı çalışmasına etki etmektedir. Kaynakların üretim katkısını ve sistemin

kararlılığını analiz etmek için doğrusal programlamaya dayalı optimum yük akışı modeli kullanılmaktadır [66, 67].

Güç sistemlerinde iletim şebekesinin orta ve uzun vadede genişletilmesinin planlanması için de bir optimizasyon yöntemi kullanılabilir. Bu optimizasyonda amaç fonksiyonu, yatırım maliyetine ek olarak işletme maliyetlerinin toplamından elde edilen toplam maliyetleri en aza indirmektir. Bu amaç fonksiyonu bazı kısıtlamalara tabi olarak belirlenmektedir. Buna göre hatlardaki akım maksimum kapasitesini aşmamalı, üretim miktarı transformatörlerin en yüksek voltaj aralığını aşmamalıdır. Güç sisteminde talep arz dengesinin değişmesi ve işletme kısıtlamaları ihlal edilirse, yeni kaynaklarla üretim tesisleri kurulmalıdır [68, 69].

Güç sistemlerinde yeni üretim kaynaklarının dâhil olduğu bir sitem karmaşık hale gelecektir. Sistemin kararlı çalışmasını sağlayan generatörlerin optimum konumunu belirlemek ve karmaşık problemleri çözmek için bir algoritma oluşturulmalıdır. Bu algoritma elektrik güç dağıtım sistemlerini optimize edilecek amaç fonksiyonu, hatlardaki aşırı yüklenmeler ve baralardaki gerilim düşümlerinden kaynaklanan karasızlıkların çözümünü sunmaktadır. Bu tez çalışmasında güç sisteminde gelecekte olabilecek farklı senaryolar (yük artışları gibi) durumunda sadece ihtiyaç duyulan üretim miktarını belirlemenin yanı sıra üretim birimi konumunun seçiminin rastgeleliği ve buna çözüm belirlemek için metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

3.3. Standart Bara Sistemleri

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), güç sistemleri testlerini standardize etmek ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için standart bara sistemleri sunmaktadır. 14 baralı “IEEE 14-Bus Test System” test sistemi, küçük ölçekli bir güç sistemi modelidir ve güç sistemleri araştırmaları ve analizleri için sıkça kullanılır. Bu bara sistemi, Yüksek (YG), orta (OG) ve düşük gerilim DG) düzeylerinde baralar içerir ve farklı tip transformatörler, generatörler ve yükler ile tanımlanır. IEEE 39-Bus Sistemi, güç sistemleri araştırmaları, analizleri ve testleri için yaygın olarak kullanılan diğer bir standart test sistemi modelidir. Bu model yine IEEE tarafından geliştirilmiştir ve genellikle literatürde "IEEE 39-Bus Test System" veya "IEEE 39-Bus Standard Test System" olarak adlandırılır. Bu standart bara test sistemleri, güç sistemi planlaması, güç akışı analizi, güç sistemi kararlılığı, güç kalitesi analizi, reaktif güç kompanzasyonu ve diğer güç sistemleri araştırmaları için örnek bir test

platformu olarak kullanılmaktadır. Bu tip standart test sistemleri, güç sistemleri üzerine çalışan araştırmacılar arasında güç sistemlerinin davranışlarını ve performansını anlamak ve çeşitli senaryoları simüle etmek için yaygın olarak kullanılan değerli araçlardır.

Güç sistemlerinde baralar iletim hatlarının, transformatörlerin ve diğer elektrik bileşenlerinin bir araya geldiği bağlandığı noktalardır. Bu noktalar, yük akış analizlerinde önemli rol oynar. Yük akış analizi bir güç sisteminde bulunan baralarda gerilim genliklerini, gerilim açısını ve iletim hatlarındaki güç akışlarını hesaplamak için yapılan kararlı durum analizlerinden biridir. Bu uygulamalarla farklı çalışma şartlarında ve farklı donanım konfigürasyonları ile güç sistemlerinin hesaplanması, tasarım ve modellemeleri ile işletme süreçlerinde kullanılan yük akışı analizleri ile

- Hatlarda meydana gelen yüklenmeleri
- Generatörlerin işletme anında yüklenmeleri
- Baralarda oluşan gerilim düşmeleri ve yükselmeleri
- Şebekeler arasındaki güç alışverişi,
- Tüm baralar ile üretim kaynaklarının kararlı çalışma limitleri gibi davranışlar tahmin ve analiz edilebilirler.

3.3.1. Güç sistemi modellerinde bara tipleri:

Bir güç sisteminin analizi yapılırken sistemde bulunan baraları; generatörlerin bağlı olduğu Üretim Baraları, yüklerin bağlı olduğu Yük baraları (PQ bara) ve son olarak Salınım/Gevşek barası (SL bara) olarak üç kategoriye ayrılarak değişkenler belirlenmektedir. Bir güç sistemdeki baralarla ilgili bilinen ve bilinmeyen parametreler Çizelge 3.1’de tanımlanmıştır [70].

Çizelge 3.1. Bara tipleri ve ilgili parametreler

Bara Tipi	Bilinen Parametreler	Bilinmeyen Parametreler
Salınım Barası /Gevşek Bara (Slack Bus) (SL)	V, δ (Gerilim ve faz açısı)	P, Q (Aktif ve reaktif güç)
Üretim Barası (Genarator Bus) (PV)	P, V (Aktif güç ve gerilim)	Q, δ (Reaktif güç ve faz açısı)
Yük Barası (Load Bus) (PQ)	P, Q (Aktif ve reaktif güç)	V, δ (Gerilim ve faz açısı)

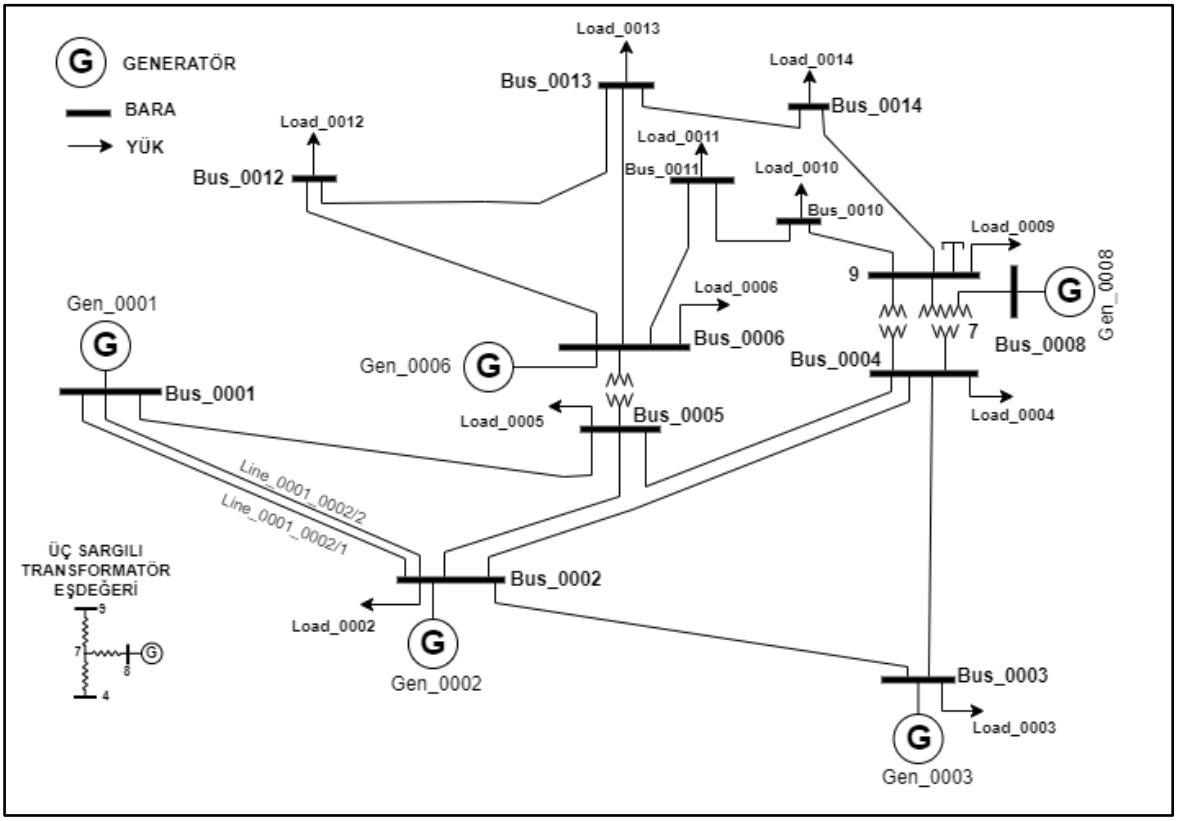
Salınım barası (SL), gerilim büyüklüğü ve açısının belirlenen değerde sabit tutulduğu bara tipleridir. Aynı zamanda gevşek bara olarak da adlandırılır. Salınım barasının açısı (δ), şebekede bir referans açısı görevi görür.

Aktif güç üretimi yapan bir enerji kaynağının bağlı olduğu bara genellikle Üretim Barası (PV bara) olarak tanımlanır. Generatörlerin bağlı bulunduğu üretim baralarında gerilim büyüklüğü kontrol edilir veya sabit tutulur. Bu barada sadece P (aktif güç) ve V (gerilim) bilinen parametrelerdir. δ (gerilim açısı) ve Q (reaktif güç) denklemlerle bulunur. Yük baralarında ise gerilim büyükleri ve gerilim açısı kontrol edilememektedir. Yük baralarına tüketilecek olan sabit güç verilir; bilinmeyen miktarda olan gerilim büyüklükleri ve gerilim açısı daha sonra hesaplanır.

Bu bölümde sunulan tanımlamalardan yola çıkarak, bir güç sisteminde baralarda güç akışlarının hesaplanması ve analiz edilmesi sistem kararlılığı ve planlama açısından büyük öneme sahiptir. Bu analizlerde kullanılacak güç akışı denklemleri doğrusal olmayan fonksiyonlardır. Bu sebeple analizlerde çözüm bulmak için sayısal yineleme yöntemleri gerekmektedir. Güç sistemlerindeki doğrusal olmayan denklemi çözmek için ise birçok farklı yöntem bulunmaktadır. DIgSILENT PowerFactory benzetim programında yük akışı analizlerinde ve hesaplamalarında Newton–Raphson yöntemi kullanılmaktadır. Benzetim programı üzerinde çalıştırılan analizlerde Newton-Raphson metodu ile bir güç sistemi üzerindeki baralar arasındaki hatların yüklenmeleri, üretim kaynakları olan generatör yüklenmeleri ve bara gerilim değerlerindeki değişimler görülebilmektedir.

3.3.2. IEEE 14 Bara test sistemi modeli ve özellikleri

Standart bir güç sisteminde bulunan üretim, iletim, dağıtım birimleri ve yüklerden oluşan IEEE 14 baralı (14 bus) test sistem modeli Şekil 3.1'de görülmektedir. IEEE 14 baralı standart test sisteminde bulunan, Bara 1, Bara 2, Bara 3, Bara 6 ve Bara 8 olmak üzere beş baraya üretim kaynağı (generatör) bağlanarak üretim barası oluşturulmuştur. Test sisteminde bulunan diğer 9 baraya ise yük bağlanmış ve yük barası olarak tanımlanmıştır. Sistemde baralar ve diğer donanımlar arasında bağlantının yapıldığı toplam 16 iletim hattı bulunmaktadır.



Şekil 3.1. IEEE 14 Baralı (14 bus) standart test sistemi modeli

Çizelge 3.2'de IEEE 14 bara güç sistemine ait baraların (Bus) parametre değerleri (güç, tip, eşik değerler), Çizelge 3.3'te güç sistemindeki hatların parametre değerlerini (Empedans, Reaktans, Direnç), Çizelge 3.4'te güç sisteminin yük parametre değerlerini (aktif, reaktif güçler), Çizelge 3.5'te ise sistemde yer alan generatör baralarının parametreleri (Güç, gerilim değeri vb.) verilmiştir.

Çizelge 3.2. IEEE 14 Bara parametreleri

Bara No	Bara tipi	Bara aktif gücü (MW)	Bara reaktif gücü (Mvar)	Bara gerilim genliği (pu)	Bara gerilim açısı	Bara gerilimi nin üst eşik değeri (pu)	Bara gerilimi nin alt eşik değeri (pu)
1	S B	0	0	1.06	0	1.06	0.94
2	P V	21.7	12.7	1.04	-4.98	1.06	0.94
3	P V	94.2	19	1.01	-12.7	1.06	0.94
4	P Q	47.8	-3.9	1.01	-10.3	1.06	0.94
5	P Q	7.6	1.6	1.02	-8.78	1.06	0.94
6	P V	11.2	7.5	1.07	-14.2	1.06	0.94
7	P Q	0	0	1.06	-13.4	1.06	0.94
8	P V	0	0	1.09	-13.4	1.06	0.94
9	P Q	29.5	16.6	1.05	-14.9	1.06	0.94
10	P Q	9	5.8	1.05	-15.1	1.06	0.94
11	P Q	3.5	1.8	1.05	-14.8	1.06	0.94
12	P Q	6.1	1.6	1.05	-15.1	1.06	0.94
13	P Q	13.5	5.8	1.05	-15.2	1.06	0.94
14	P Q	14.9	5	1.03	-16	1.06	0.94

Çizelge 3.3. IEEE 14 Bara hat bilgileri

Hat adı	Hat no		R (mΩ/m)	X (mΩ/m)	Z (mΩ/m)
	Hat başı bara no	Hat sonu bara no			
Line_0001_0002/1	1	2	6.753	20.619	21.697
Line_0001_0002/2	1	2	6.753	20.619	21.697
Line_0001_0005	1	5	9.414	38.862	39.986
Line_0002_0003	2	3	8.187	34.494	35.452
Line_0002_0004	2	4	10.125	30.722	32.347
Line_0002_0005	2	5	9.922	30.296	31.880
Line_0003_0004	3	4	11.675	29.800	32.005
Line_0004_0005	4	5	2.326	7.337	7.697
Line_0006_0011	6	11	1.034	2.166	2.400
Line_0006_0012	6	12	1.338	2.785	3.090
Line_0006_0013	6	13	0.720	1.418	1.591
Line_0009_0010	9	10	0.346	0.920	0.983
Line_0009_0014	9	14	1.384	2.944	3.253
Line_0010_0011	10	11	0.893	2.091	2.274
Line_0012_0013	12	13	2.405	2.176	3.244
Line_0013_0014	13	14	1.861	3.789	4.222

Çizelge 3.4. IEEE 14 Bara yük bilgileri

Yük Bilgileri			
Bağlı olduğu bara No	Yük adı	Aktif gücü (MW)	Reaktif gücü (Mvar)
2	Load_0002	21.7	12.7
3	Load_0003	94.2	19
4	Load_0004	47.8	-3.9
5	Load_0005	7.6	1.6
6	Load_0006	11.2	7.5
9	Load_0009	29.5	16.6
10	Load_0010	9	5.8
11	Load_0011	3.5	18
12	Load_0012	6.1	1.6
13	Load_0013	13.5	5.8
14	Load_0014	14.9	5

Çizelge 3.5. IEEE 14 bara generatör bilgileri

Bağlı olduğu bara No	Generatör adı	Aktif gücü (MW)	Gerilim değeri (pu)	Maksimum Aktif Gücü (MW)	Minimum Aktif Gücü	Reaktif Gücü (Mvar)	Maksimum Reaktif Gücü (Mvar)	Minimum Reaktif Gücü (Mvar)
1	Gen_0001	232.4	1.06	200	50	-16.9	100	−40
2	Gen_0002	40	1.04	80	20	-42.4	50	-40
3	Gen_0003	0	1.01	50	15	-23.4	40	0
6	Gen_0006	0	1.07	35	10	12.2	24	-6
8	Gen_0008	0	1.09	30	10	17.4	24	-6

3.4. Yeni Üretim Kaynaklarının Sisteme Etkisi

Güç sistemlerindeki yüklerdeki artış, üretim kapasiteleri, hat yüklenmeleri gibi göstergelerin değişmesi olası kararsızlık problemlerini beraberinde getirecektir. Bu problemlerin iyileştirilmesi, hat takviyesi ve trafo merkezlerinin eklenmesinin yanı sıra sisteme dâhil edilecek yeni kaynaklarla yapılabilmektedir. Geleneksel güç sistemlerinde elektrik enerjisi depolanamadığından dolayı sistem genelinde arz-talep dengesi sürekli olarak sağlanmalı, bu şekilde enerji kalitesi, frekans ve gerilim kararlılığı temel parametrelerle belirtilen sınırlar içinde kalmalıdır. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını sağlamak için elektrik santralleri, yenilenebilir enerji santralleri, batarya sistemleri ile üretilen güç ile birlikte tüketilen aktif güç miktarı kontrol edilerek elektrik arz-talep dengesi sağlanmalıdır. Örneğin yükün artması durumunda güç sisteminin kapasitesi iyileştirilebilir. Bu durum planlanmasında sosyal ve

çevresel faktörlerin belirsizliğini hesaba katan kısa vadeli modelleme ve yükün belirsizliklerini dikkate alan uzun vadeli modelleme yapılabilmektedir. Kısa vadeli yük modelleme, bir trafo merkezinin günlük tepe değerlerini iki ayda bir alır. Uzun vadeli yük modelleme, bir trafo merkezinde birkaç yıl boyunca gözlemlenen yıllık tepe talep değerlerini toplar, ardından doğrusallaştırılmış yük akış denklemlerini kullanarak sistem durumlarını elde etmek için bir yük akışı gerçekleştirilir [71, 72]. Yük akış analizleri, bilinen girdi parametreleri ile yapıldığından, değerlerdeki herhangi bir değişiklik, yeni bir yük akışı çözümü gerektirmektedir.

Hatlardaki güç akışları, klasik doğrusal olmayan yük akış denklemleri kullanılarak sistem durumlarından elde edilir. Önceki endekslerin yeterliliğine ek olarak, yük akış simülasyonunun sonuçları, geleneksel deterministik çalışmaya göre daha fazla bakış açısı sağlar. Buna alternatif olarak, bir hat inşa etmek yerine güç üretimi artırılarak da sistem kararlı hale getirilebilir [73]. Yeni üretim kaynaklarının stokastik davranışını hesaba katmak için bir güç sisteminin kısa vadeli planlanması ve simülasyonun sonuçları, geleneksel en kötü senaryo planlama ilkesine kıyasla sistemin aktarım kapasitesini artırma yeteneğini göstermektedir [74]. Belirli bir bölgede üretimin yaygınlaştırılması için kurulması gereken en uygun enerji kaynaklarının hangileri olduğunun ve bu kaynakların hangi durumlarda işletmede olması gerektiğinin tespitine yönelik bir analiz yapılabilir. Planlamada kapasite gereksinimlerini bilmek için deterministik yöntemlerde kullanılabilir [75]. Güç sistemlerine yenilenebilir enerji kaynakları dâhil edildiğinde rastgele değişkenlerin sayısı ve sistem karmaşıklığı artmaktadır.

Güç sistemlerinde yeni kaynaklar eklenmesi ve optimum yer tayini sağlanırken çok sayıda farklı analitik yöntemler, sezgisel-metasezgisel algoritmalar veya karma (hibrit) yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, aktif güç kayıplarını azaltmak, gerilim kapasitesini ve sistem kararlılığını sağlamak, aktif ve reaktif güç dengesini sağlamak gibi amaçlar için önerilmiştir [76]. Yeni kaynaklar sisteme uygun planlanma yapılmadan yerleştirilmesi durumunda, şebekede fazladan üretim, koruma ve topraklama problemleri, gerilim yükselmeleri, hat yüklenmeleri gibi çeşitli problemlere yol açabilirler [76]. Bu kaynakların yer tayini ve boyutlarının uygun planlamalar ile optimize edilmesiyle; gerilim kararlılıklarında iyileştirme, sistem kayıplarının azaltılması ve ekonomik faydalar sağlanmış olur.

Güç sistemlerinde sisteme eklenecek aktif ve reaktif güç üreten yeni kaynaklar dört farklı kategoriye ayrılabilir. Bu kaynaklardan ilki güç elektroniği teknolojileri ile şebekeye entegre edilen ve yalnızca reaktif güç üreten (Fotovoltaik Sistemtemler, bataryalar vb.) kaynaklardır. İkinci grup kaynaklara sıfır güç faktöründe çalışan ve yine yalnızca reaktif güç üretebilen senkron kompansatörler örnek gösterilebilirler. Üçüncü tip üretim kaynaklarına hem aktif hem de reaktif güç sağlayabilen kaynaklar örnek olarak verilebilir. Geri güç faktöründe işletilen senkron generatörler ve rüzgâr türbinleri bu kaynak türlerindendir. Son olarak aktif güç üretimi yapmakla beraber reaktif güç tüketimi yapan İleri güç faktöründe çalışan indüksiyon generatörleri, güç sistemlerinde kullanılabilen merkezi ve dağıtılmış üretim kaynaklarıdır [59, 77].

Yeni üretim kaynaklarının eklenmesi, güç sisteminin üretim kapasitesini artırmaktadır ve bu da kararlılık üzerine olumlu bir etkiye sahiptir. Yeni kaynakların sisteme eklenmesi, belirli bir bölgedeki güç talebinin artması veya mevcut kaynakların yetersiz kalması durumunda gereklidir. Gerilim kararlılığı, elektrik enerji sisteminin gerilim değerinin normal işletimde ve hata durumlarında gerilim kontrolü ile belirli kısıtlar dahilinde tutulmasını sağlamak için gereklidir. Gerilimin dengelenmesi, üretilen ve tüketilen reaktif güce dayanır. Güç sisteminde, gerilim kontrolü genellikle reaktif güç kontrolü ile yapılır fakat ağın ihtiyaç duyduğu reaktif güç uzun mesafelere aktarılma problemlerinden dolayı ağ boyunca reaktif güç üretim kaynakları bulunmaktadır. Bu nedenle gerilim kontrolü için gereken reaktif güç yerel olarak ihtiyaç duyulan noktalarda sağlanır [78].

Elektrik güç sistemlerinde kararlılığı sağlamak adına sisteme dahil edilecek kaynaklarla, gerilim kararlılığı kontrolü, frekans kararlılığı kontrolü, açı kararlılığı kontrolü gibi durumlarda sistemin limit değerler arasında tutulması sağlanabilmektedir. Güç sistemine eklenecek olan yeni kaynakların sisteme etkileri şu şekilde sıralanabilir;

Sisteme eklenen kaynaklar, harmoniklere ve güç kalitesinde düşüşe yol açabilmektedir. Bu tarz olumsuzluklar güç kesintilerine, sistem kararsızlıklarına yol açacağı için, kaynak boyutu ve yeri büyük önem arz etmektedir. Genel olarak sisteme eklenen yeni kaynaklar gerilim kararlılığını olumlu yönde etkiliyor olsa dahi özellikle yüksek güçlerdeki kaynaklar gerilim artışına sebep olacağından, koruma sistemlerinin aktif olmasına neden olacaktır. Bu durum kaynak boyutunun ve konumunun tayininde önemli bir detaydır. Yeni eklenecek kaynakların

sistem limitlerinin üzerinde bir güçte seçilmesi durumunda hat yüklenmeleri ve buna bağlı hatlarda kayıplara yol açmaktadır.

Bu bölümde açıklanan durumlar doğrultusunda, güç sistemlerinde birçok kararsızlık sorununun yeni kaynaklar eklenerek çözülebileceği sonucu çıkarılabilir. Ancak, eklenecek bu kaynakların konumlandırmasında yük akış analizleri yapılarak, en uygun yer ve boyutlardaki kaynakların yerleştirilmesi sistem kararlılığı üzerinde olumlu etkiler sağlayacaktır. Aksi durumda, farklı kararlılık sorunları meydana getirebilmektedir.

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

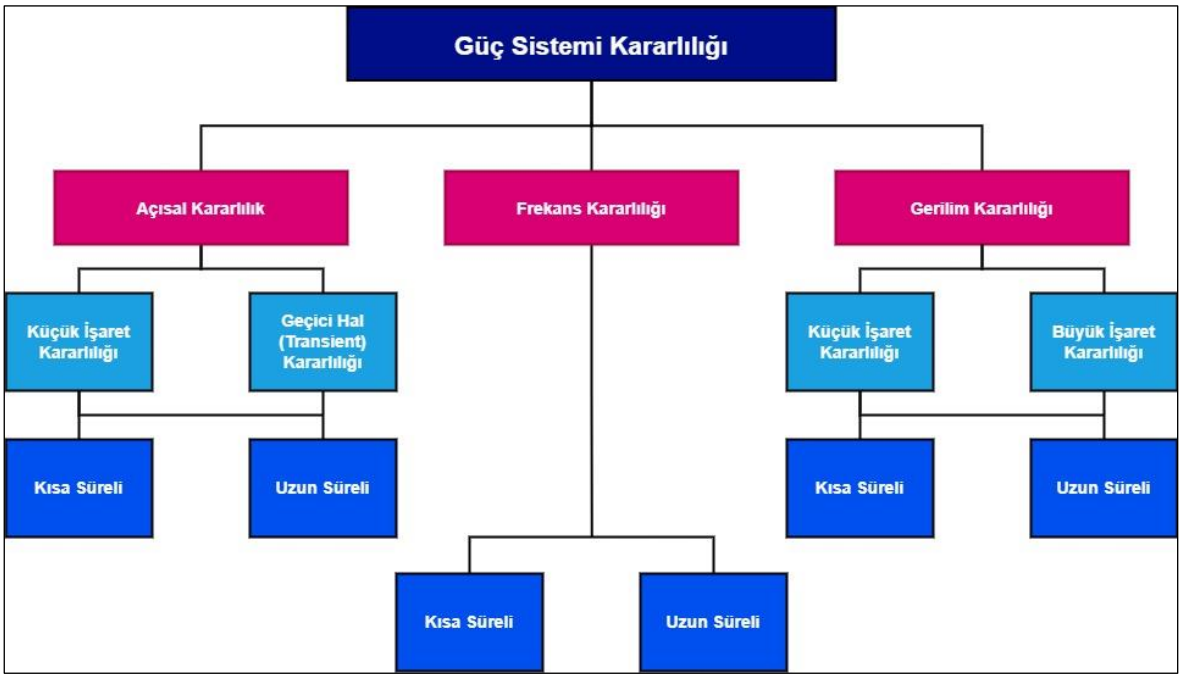
Günümüzde bir güç sisteminde kabul edilebilir çalışma şartlarının belirlenmesi ve verimli çalışmasındaki faktörlerin başında karalılık gelmektedir. Bu faktörlerden klasik olarak açı kararlılığının yanı sıra son zamanlarda yaşanan gerilim çökmesi olayları neticesinde gerilim kararlılığı da dikkat çekmiştir [5]. Modern bir güç sisteminin tahsisi, işletilmesi ve kontrolü; yüksek dereceli çok değişkenli bir süreçtir. Bu sistemde birçok cihaz; sistemin dinamik davranışlarını etkileyen, farklı özelliklere sahiptir. Burada yüklerdeki güç artışlarının, üretim kaynakları tarafından karşılanmalarına bağlı olarak ortaya gerilim kararsızlıkları oluşabilmektedir. Kararlılık ise ağ topolojisine bağlı olarak bu farklı özellik ve dinamik tepkilere sahip cihazların sistem çalışma koşullarında dengede olması durumudur. Bu kaynaklar ile yük arasında aktif güç dengesinin oluşturulmasıdır. Diğer bir değişle gerilim kararlılığı ifadesi, güç sistemlerinde beklenmedik durumlar sonucunda (yük artışı, arıza, bozucu etkenler vb.) sistemin stabil durumuna dönebilme yeteneği olarak da tanımlanabilmektedir. Güç sistemi kararlılığının sağlanması, sistemin verimli ve güvenli bir şekilde çalışması açısından önemli bir noktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen kararsızlıklar nedeniyle oluşan sistem çökmeleri gibi problemler meydana gelmektedir. Meydana gelebilecek sorunlara karşı sistemin güvenli ve kararlı halde çalışmasını sürdürecek şekilde tasarlanması ilk etapta pratik olarak mümkün olmayabilir. Güç sistemi kararlılık problemlerinin çeşitliliği ve karmaşıklığı nedeniyle, belirli kararlılık problemlerinin analizinde uygun bir sistem modelinin ve uygun analitik yöntemlerin kullanılması çözümü basitleştirmek için önemlidir. Ancak güç sistemlerinde tasarım, modelleme yapılırken en çok problem olabilecek senaryolar üzerinde çalışmalar yapılır. Buna göre yapılacak çalışmalarda mümkün olduğunca doğru ve gerçekçi modellemeler üzerinden senaryo kurgulanmalıdır. Yukarıda bahsedildiği üzere, güç sistemlerinde kararlılık sorunları farklı sınıflandırmalar çerçevesinde incelenmektedir.

4.1. Güç Sistemlerinde Kararlılıkların Sınıflandırılması

Güç sistemlerinin değişken doğası gereği, sistem davranışları yük değişimleri, kaynakların devreye girip çıkması, hat değişimleri ve arızalanmalar gibi durumlarda değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle güç sistemi kararlılığı, birçok etkene bağlıdır. Örneğin, güç sistemlerindeki üretim ve tüketim arasındaki denge önemlidir. Elektrik enerjisinin sürekli olarak tüketici talebini karşılaması gerekmektedir. Üretimdeki ani değişimler, örneğin büyük

bir santralin veya rüzgâr enerjisi santralinin devreye alınması veya çıkartılması gibi durumlar, güç sistemlerinin kararlılığını etkileyebilir. Bu tür değişimler, sistemde gerilim dalgalanmalarına veya frekans kaymalarına neden olabilir. Benzer şekilde güç sistemlerindeki yük değişimleri, kararlılık üzerinde doğrudan etkisi olan önemli bir faktördür. Yük değişimleri, güç sistemine gelen talepteki ani artış veya azalışları ifade eder. Örneğin, büyük bir endüstri tesisinin devreye alınması veya bir şehirdeki tüketim talebindeki anlık bir artış, güç sisteminin dengesini bozabilir ve kararlılık sorunlarına neden olabilir.

Güç sisteminde kararlılık, sistemin dengeli bir çalışma durumunda olması ve meydana gelebilecek bozucu etkilerden sonra eski haline tekrar dönebilmesi yeteneğidir. Bu noktada kararlı bir işletim sağlanması için açısal kararlılık, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı olmak üzere üç temel unsur üzerinden analizler ve iyileştirme yapılmaktadır. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere bu temel başlıkların yanı sıra birçok alt başlıkta da kararlılık analizleri gerçekleştirilmektedir [8]. Dolayısıyla çoğu zaman güç sistemlerinin kararlılığı karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle benzetim çalışmaları bu analizlerin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 4.1. Güç Sistemlerinde Kararlılık Unsurları

4.1.1. Açısal kararlılık

Açısal kararlılık veya bir başka ifade ile rotor açı kararlılığı güç sistemlerindeki generatörlerin ve yüklerin açısal pozisyonlarının zamanla değişmesini kontrol etme yeteneği anlamına gelir. Açısal kararlılık esas olarak güç sistemindeki elektromekanik salınımları içermektedir. Bu sistemlerde, açısal kararlılık, sistemin dengede kalabilmesi ve beklenmeyen frekans ve gerilim dalgalanmalarının önlenmesi için önemli bir faktördür. Sürekli hal durumlarında generatörlerin mekanik giriş momenti ile elektromanyetik çıkış momenti arasında bir denge söz konusudur. Bir güç sistemine ani yük değişimleri veya hat arızaları gibi dış etkiler olduğunda, sistemdeki generatörlerin açısal pozisyonları değişir ve frekans dalgalanmaları ortaya çıkar. Açısal kararlılık, bu tür dalgalanmaların hızla kontrol altına alınmasını sağlar ve sistemin stabil bir şekilde çalışmasını garanti eder. Aksi takdirde, sistemin dengesi bozulabilir, gerilim düşmeleri veya gerilim yükselmeleri gibi istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir ve hatta sistem çöküşüne yol açabilir. Eğer sistemde bir bozucu etki oluşmuşsa rotor ya hızlanacaktır ya da yavaşlayacaktır. Sistemdeki bulunan generatörlerden birinin hızı diğerine göre geçici bir şekilde artış gösterirse açı olarak diğerlerinin önüne geçecektir. Bu hız ve açı farkından dolayı yükün bir kısmı yavaş olandan hızlı olana doğru akacaktır. Böylece hızlar arasındaki fark, buna bağlı olarak da açısal fark da azalır.

Sistemdeki güç ve açı arasındaki ilişki lineer olmayan bir olaydır. Güç sistemlerinin açısal kararlılığını değerlendirmek için ayrıntılı analizler yapılması gerekmektedir. Doğru açısal kararlılık analizi, sistemdeki güç akışlarını, generatörlerin ve yüklerin matematiksel modellerini kullanarak simüle eder. Bu analiz, sistemdeki kritik noktaları belirlemek ve olası açısal kararlılık sorunlarını tespit etmek için kullanılır. Öte yandan sistemin dengesini sağlamak için gerilim düşmesi ve gerilim yükselmeleri kontrol altına alınmalıdır. Transformatörlerin ve regülatörlerin doğru bir şekilde kullanılması, gerilim dalgalanmalarını en aza indirerek açısal kararlılığı artırmaktadır.

Güç sistemlerinde açısal kararlılığı sağlamak için kontrol sistemleri ve otomatik ayarlar kullanılır. Generatörler arasında güç paylaşımını dengelemek, frekans ve gerilim dalgalanmalarını kontrol etmek için geri beslemeli kontrol sistemleri kullanılır. Bu sistemler, açısal kararlığı sağlamak ve sistemin istikrarını korumak için generatörlerin tepkilerini optimize eder. Ayrıca reaktif güç, güç sistemlerinde açısal kararlılığı etkileyen bir diğer önemli faktördür. Reaktif güç dengelemesi için ise kondansatörler ve reaktif güç

kompanzasyon ekipmanları kullanılır. Bu ekipmanlar, sistemdeki reaktif güç dengesini sağlayarak gerilim dalgalanmalarını kontrol altına alır. Ayrıca baralardaki kademeli gerilim düşümüne rotor açı karasızlığı sebep olabilir. Örnek verecek olursak elektrik dağıtım ağlarında orta noktalarda hızlı gerilim düşümü olursa güç sistemde bulunan iki grup makinede rotor açılarının 180º derecelik faz farkı sonucunda senkronizasyon kaybı olacaktır. Normalde güç sistemlerinde bulunan koruma sistemleri bu iki grup makineyi birbirinden ayırır ve gerilimin geri dönüşü bu ayırmanın seviyesine bağlıdır. Ancak sistem ayrılmazsa iki grup makinenin kutup kaymasından dolayı bu merkezde gerilim hızlıca aşağı ve yukarı değerlerde salınacaktır. Buna karşılık, sürekli gerilim düşümü tipinde gerilim karasızlığı yüklerle ilişkilidir ve rotor açı kararlılığını konu almayan bir durum oluşur. Küçük sinyal rotor açısı kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalar karşısında senkronizmada kalabilmesi yeteneği olarak ifade edilebilir. Küçük sinyal kararlılığı sistemin ilk başlangıç durumlarına bağlıdır. Kararsızlık iki şekilde meydana gelebilir; senkronizma momentinin yetersizliği neticesinde düzensiz salınımlar veya rotor açısının artışı veya yetersiz moment nedeniyle rotor salınımlarının artmasıdır. Küçük sinyal rotor açısı kararlılık çalışmaları 10–20 saniye süreli salınımlar üzerine yapılmaktadır. Geçici karalılık veya büyük rotor açısı kararlılığında, iletim hattındaki kısa devre gibi ciddi ve kritik bozulmalarda sistemin senkronizmada kalması yeteneğidir. Sistemin cevabı, generatör açısını büyük değişimleri ve bunun sonucunda güç-açı ilişkisindeki nonlineerliktir. Geçici kararlılık ise 3–5 saniyelik bozulmalar olmasına karşın daha büyük sistemlerde bu süre artarak 10–20 saniyeye kadar çıkabilir. Rotor açısı kararlılığı, dinamik kararlılık olarak da ifade edilmektedir.

4.1.2. Frekans kararlılığı

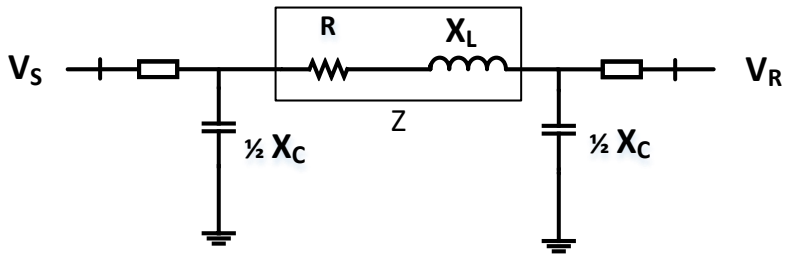
Güç sisteminin nominal frekans değerinde kararlı bir şekilde çalışmasına olanak sağlayan bir diğer önemli bir faktör olan frekans kararlılığı, üretim ve yük arasında önemli bir dengesizliğe neden olan ciddi bir sistem bozulmasından sonra sisteminin sabit frekansta kalma yeteneğini ifade etmektedir. Frekans kararlılığı, güç üretimi ve talebi arasındaki dengeyi korur ve sistemdeki tüm elektrik yüklerine güvenilir bir güç kaynağı sağlar. Üretim ve yük arasındaki olası bir dengesizlik durumunda sistem frekansının nominal değere göre sapmasına dolayısıyla da güç şebekesinin açısal frekansında değişikliklere sebep olur.

Güç sistemlerinde frekans kontrolü otomatik ve manuel olarak sağlanabilmektedir. Temel olarak frekans kontrolü üç düzeyde gerçekleştirilir. İlk iki düzey otomatik sistemlerdir ve

frekans değişimlerine çok hızlı tepki verirler. Üçüncü düzey ise üreteçlerin manuel olarak yer değiştirilmesi veya yerleştirilmesini sağlamaktadır. Güç sisteminde meydana gelen herhangi bir güç dengesizliği veya frekans sapmasında ikincil bir üretecin sisteme dâhil edilmektedir. Böylece istemeyen güç dengesizliklerine ve frekans sapmalarına karşı etkili bir çözüm sunulmaktadır. İletim hatlarında meydana gelebilecek kesintiler bazı şebeke koordinatlarında kararsızlıklara neden olabilir. Bu olumsuz durumun uzun sürmesi generatör-yük arasında yerel dengesizliklerde yol açar. Büyük orandaki frekans değişimleri aynı zamanda güç sisteminde gerilim ve güç değişimlerine neden olur. Hem gerilim hem de frekans açısından büyük değişiklikler şebekede bulunan üreteçlerin sistemden kopmasına neden olmaktadır.

4.1.3. Gerilim kararlılığı

Gerilim kararlılığının sağlanmasıyla, düşük gerilim dalgalanmaları, gerilim çökmesi ve gerilim dalgalanmaları gibi olumsuz etkilerin etkilerini en aza indirgenmesi amaçlanır. Bir güç sistemindeki gerilim kararlılığının, gerilim değeri ve reaktif güç dengesi ile ilişkili olduğu söylenebilir. Bir güç sisteminin gerilimini sistem içerisinde birçok farklı etkiyen vardır. Örnek olarak reaktif güç dengesi ve gerilim değeri hem generatörlerde üretilen reaktif güce hem de iletim hatlarına ve kompanzatörlere bağlı olması gösterilebilir. Ayrıca, yük admitansının artması gibi durumlar, yük gücünün de artmasına neden olacağından, gerilim kararlılığı yük admitansına da bağlıdır. Reaktif güç değişimi gerilim kararlılığını bozan en önemli faktördür [79]. Gerilim dengesizlikleri ise hem iletim hem de dağıtım sistemleri için en büyük problemlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Güç sisteminde talep edilen güç ile tüketilen güç dengeli değilse gerilim dengesizlikleri meydana gelebilir. Gerilim kararlılığı çalışmaları, gerilim dalgalanmaları ve gerilim çökmesi gibi olumsuzlukların etkilerini minimize etmeyi amaçlar. Özellikle sistemdeki bir veya birden fazla barada üretimin yetersiz kalması veya tüketimin fazla olması gibi durumlar sistemin bazı noktalarında gerilimin düşmesine ya da gerilimin yükselmesine sebep olabilmektedir. Bu gerilim dalgalanmaları ve kararsızlık halindeki gerilim çökmesi, tüketici ekipmanlarının doğru şekilde çalışmasını etkileyebilir ve hatta büyük boyutlu hasarlara neden olabilmektedir. Şekil 4.2 iki bara arasındaki bir iletim hattının eşdeğer devresini göstermektedir.



Şekil 4.2. İki bara arasındaki bir elektrik iletim hattının eşdeğer devresi

Şekildeki iletim hattı eşdeğer devresinde kaynak uç gerilimi V_S, iletim hattı direnci R, iletim hattının endüktif reaktansı X_L, hattın kapasitif reaktansı X_C ve alıcı uç gerilimi ise V_R ifade edilmiştir. İletim hattının gerilime bağlı olarak ürettiği reaktif güç X_C karakteristiğine bağlıdır. Akıma bağımlı tükettiği reaktif güç ise X_L karakteristiğine bağlıdır. Buna göre hattın toplam empedansını gösteren Z, Eş. 4.1 ile ifade edilebilir.

$$Z = R + JX_L \tag{4.1}$$

Bir hattın toplam gücü (P) ise Eş. 4.2 ile elde edilmektedir. Bu eşitlikte sigma (δ) kaynak (V_S) ve alıcı uç gerilimleri (V_R) arasındaki faz açısını temsil etmektedir.

$$P = \frac{V_s.V_r}{z} . \sin\delta \tag{4.2}$$

Benzer olarak reaktif güç (Q) ise Eş. 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{V_s.(V_s - V_r.\cos\delta)}{z} \tag{4.3}$$

Bu eşitliklerden görüldüğü üzere hem aktif hem de reaktif güç bileşenleri sigma (δ) açısı ve hat empedansı ile doğrudan ilişkilidir. Bu noktada hattın uzunluğu, dolayısıyla kullanılan iletken malzemenin türü ve güç sistemi topolojisi önemli unsurlar olarak belirtilebilir. İletim hattı normal yük kapasitesinin altında yüklendiğinde kapasitif, normal yük kapasitesinin üstünde yüklendiğinde ise endüktif davranmaktadır. Eşitliklere göre iki bara arasındaki aktif-reaktif güç akışı ve yönü belirlenebilir. İletim hattının uzunluğu ve yapısı, aktif ve reaktif güç taşıma kapasitesini etkilemektedir. Aynı zamanda, aktif ve reaktif güç miktarındaki değişimler baralardaki gerilim değerlerinde ve faz açılarında değişime neden olmaktadır.

Şekil 4.1'den gerilim kararlılığının ayrıca alt kategorilere ayrıldığı görülebilir. Bunlar; büyük bozucu gerilim kararlılığı, küçük bozucu gerilim kararlılığı ve bunların da alt kategorilerinden kısa süreli gerilim doygunluğu ve uzun süreli gerilim kararlılığıdır. Bu sınıflandırmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir.

Büyük işaret kararlılığı: Sistem arızalarını, üretim kaybını veya devre olasılıklarını içerir [80, 81]. Büyük bir kesinti ve sonraki sistem kontrol eylemlerinin ardından, sistemdeki tüm baralardaki gerilimler kabul edilebilir seviyelere düşerse, sistemin büyük bozucu gerilim kararlı olduğu söylenir. Eş.4.4'te karma potansiyel fonksiyonu, standart forma sahip olan büyük bozulmayı modellemek için tanıtılmıştır; burada -A(i) akım potansiyeli ve B(v) voltaj potansiyelidir; i, indüktörlerden geçen akımdır ve v, kapasitör üzerindeki voltajdır; γ ve α sabit vektörlerdir.

$$P_{i,v} = -A(i) + B(v) + (i, \gamma v - \alpha) \tag{4.4}$$

Küçük işaret kararlılığı: Sistemin, sistem yükündeki artış gibi küçük bozulmalara maruz kaldığında, sistemin kabul edilebilir bir sabit voltaj seviyesini koruma yeteneği ile ilgilidir [82].

Kısa süreli gerilim kararlılığı: Asenkron motorlar, elektronik olarak kontrol edilen yükler ve HVDC dönüştürücüler [83–85] gibi hızlı hareket eden yük bileşenlerinin dinamiklerini içerir. İlgili çalışma süresi birkaç saniye mertebesindedir ve analiz, uygun sistem diferansiyel denklemlerinin çözümünü gerektirir.

Uzun süreli gerilim kararlılığı: Kademe değiştiren transformatörler, termostatik olarak kontrol edilen yükler gibi daha yavaş hareket eden ekipmanların dinamiklerini içerir.

Yukarıda özetlenen birçok nedenden dolayı meydana gelen gerilim kararsızlığına yol açan etkenler ise şunlardır [86]:

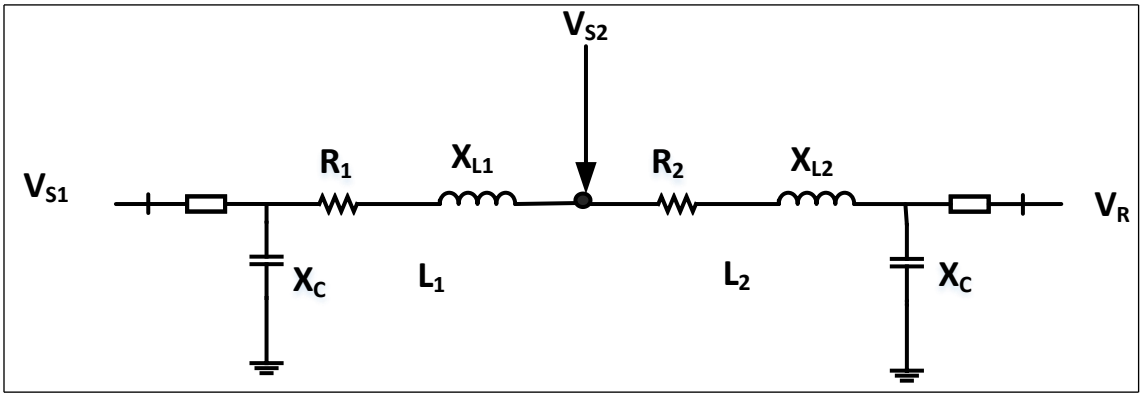
- Yük talebindeki artış
- Generatörlerin, senkron kondenserlerin veya SVC (Static VAR Compensator) 'nin reaktif güç çıkışlarının limitlerine ulaşması

- Kademe değiştiren transformatörlerin hareketi
- Yük geri kazanım dinamikleri
- Hat açma veya generatör kesintileri

Bu etkenler güç sistemindeki güç üretimi, tüketimi ve iletimi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu olumsuzlukların üstesinden gelmek ve kararsızlığı önlemek için çeşitli kontrol eylemleri birçok çalışmada incelenmiştir [86–91]. Bu çalışmalardan gerilim kararlılığı sağlanmasında şu işlemler ön plana çıkmıştır.

- Şönt kapasitörlerin anahtarlaması
- Kademe değiştiren transformatörlerin bloke edilmesi
- Jeneratörlerin geçici reaktif güç ile aşırı yüklemesi
- Yük atma
- Sisteme yeni üretim kaynaklarının eklenmesi

Bu çalışmalardan yola çıkarak bir güç sistemi modelinde yeni bir üretim kaynağının eklenmesi örneği Şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3. İki kaynaklı bir güç sisteminin hat modeli

Burada V_{S1} ile yük arasındaki toplam empedans aşağıdaki eşitliklerde verilen Z_1 ve Z_2'nin toplamına eşitken V_{S2} ile yük arasındaki hat empedansı yalnızca Z_2'ye eşittir. Bu durum hattın uzunluğunun toplam empedans üzerindeki etkisini göstermektedir.

$$Z_1 = R_1 + jX_{L1} \tag{4.5}$$

$$Z_2 = R_2 + jX_{L2} \tag{4.6}$$

$$Z_{V1} = Z_1 + Z_2 \tag{4.7}$$

$$Z_{V2} = Z_2 \tag{4.8}$$

Eş. 4.7 ve Eş. 4.8'nin etkileri Eş. 4.2 üzerinden karşılaştırılacak olursa hat mesafesi uzun olan V_{S1} kaynağının aktif güç üzerindeki olumsuz etkisi görülecektir. Benzer şekilde aynı karşılaştırma Eş. 4.3 içinde geçerlidir. Sonuç olarak X_L endüktif reaktansının büyüklüğü hattı gerilim kararlılığı açısından olumsuz etkilemektedir. Bu noktada V_{S2}'nin ek bir kaynak olarak sisteme yerleştirileceği düşünülürse yer tayininin ve kapasitesinin oldukça büyük öneme sahip olduğu söylenebilir [8]. Üretim birimlerinde üretilen enerjinin iletim hatlarıyla uzak bölgelere taşınması, trafo merkezlerinde düşürülmesi/yükseltilmesi ve oradan da son kullanıcılara kadar ulaştırılması güç sisteminde kararlılığın bir parçasıdır [58]. Bu son noktalarda yük değerlerinin artması, elektrik enerjisine olan taleplerin artması, zamanla limitlerin zorlanmasına ve üretimin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır [92]. Bu nedenle diğer durumların yanı sıra güç sisteminde, yeni üretim birimleri, yeni trafo merkezlerinin, yeni hatların inşası, genişletilmesi ve yapılandırılması sıklıkla yapılmaktadır. Bunun için planlamaların doğru yapılması, yapılacak değişikliklerin ve sistem gereksinimlerinin alt ve üst limitlerinin belirlenmesi, ona uygun seçimlerin yapılması gerekmektedir. Güç ihtiyaçlarının belirlenmesi ve sistemi kararlı durumda tutmak bu planlamada asıl amaçtır [93].

Bu bilgiler doğrultusunda güç sistemlerinde gerilim kararlığı incelendiğinde, hat uzunluğu, bara gerilimi ve generatör yüklenmesi gibi sorunlarla başa çıkmak için sisteme yeni bir kaynaklar eklemek önemli bir strateji olabilir. Güç sistemlerinde meydana gelebilecek yük artışlarına bağlı olarak gerilim kararlılık problemlerinin çözümünde eğer mevcut güç kaynakları hat uzunluğunu, bara gerilimini veya generatör yüklenmesini karşılayamıyorsa, yeni bir kaynak eklemek enerji kesintilerini önlemek veya azaltmak için kritik öneme sahip olacaktır. Ayrıca güç sistemlerinin yedekli olması, kesintiler durumunda sürekli güç sağlama yeteneği açısından önemlidir. Yeni eklenecek kaynakların boyutlandırılması için mevcut ve gelecekteki yük talepleri dikkate alınmalıdır. Yük tahminleri ve gelecekteki artış senaryoları kaynağın kapasitesini doğru bir şekilde belirlemeye yardımcı olacaktır. Kaynak boyutunun yanı sıra sisteme eklenecek kaynakların konumunda hat uzunluğu arttıkça gerilim düşümü

meydana gelmektedir. Bu nedenle, hat uzunluğu ve gerilim düşümü hesaplamaları göz önünde bulundurulmalıdır. Güç sistemleri için yeni kaynak eklemek karmaşık bir süreçtir. Yeni bir kaynak eklemek, güç sistemlerinin kararlılığını, güvenilirliğini ve kapasitesini artırabilir. Ancak, kaynak seçimi ve boyutlandırılması, dikkatlice planlanmalı ve maliyetler, çevresel etkiler ve gelecekteki ihtiyaçlar göz önünde bulundurulmalıdır. Böylece mümkün olan en düşük maliyette sistem kararlı çalışacaktır ve son kullanıcıya kadar enerji kalitesinde değişiklik olmadan güç transferi yapılabilecektir.

4.2. Gerilim Kararlılığını Etkileyen Unsurlar/Faktörler ve Analiz Yöntemleri

Güç sistemleri sürekli olarak dalgalanan yük talepleri, enerji üretimi dalgalanmaları, kesintiler ve diğer değişkenlerle karşı karşıya olmasından dolayı gerilim kararlılığı dinamik bir olaydır. Bu dinamik değişkenler güç sistemlerinin gerilim düzeylerini etkileyebilir ve bu nedenle gerilim kararlılığı sürekli olarak izlenmesi ve yönetilmesi gereken bir konu haline gelir. Ayrıca sürekli hal analizleri de birçok uygulamada kullanılmaktadır. Sürekli hal analizleri ile yük akışı denklemleri güç sistemlerini açıklanabilir. Daha önce yapılmış çalışmalara bakıldığında farklı gerilim kararlılığı analiz yöntemleri olmakla birlikte, bu metot/yöntemlerden bazıları kullanılarak gerilim kararlılığı için kritik değerlere doğrudan ulaşılırken bazı yöntemlerde ise değer olarak değil yaklaşımsal olarak referans noktalarına ulaşmıştır. Gerilim kararlılık analizleri için kullanılan bazı yöntemler ve kullanım amaçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Gerilim kararlılık analizi için kullanılan yöntemler ve kullanım amaçları [8]

Metot/Yöntem	Kullanım amacı
Yük akışı analizi	Bu analiz ile güç sistemleri çalışmalarında baralar için gerilim değerleri, enerji iletim hatlarında meydana gelen kayıplar ve hat yüklenmeleri gibi değerler bulunabilir.
P-V Eğrileri Q-V Eğrileri	Bir güç sisteminde olumsuz bir durum neticesinde ortaya çıkan veya çıkabilecek gerilim çökmesi gibi durumların tespit edilmesinde, Kritik çalışma noktalarının tespitinde kullanılmaktadır.
Sürekli yük akışı analizi	Güç sistemlerinde Sürekli yük akış analizi ile işletme noktaları belirlenmektedir. Sürekli yük akışında ortaya çıkan çözüm bu işletme noktalarının oluşturduğu dizilerdir. Yük akışı metodunda tahmin düzeltme basamağı esas alınmıştır.

Çizelge 4.1. (devam) Gerilim kararlılık analizi için kullanılan yöntemler ve kullanım amaçları [8]

L İndisi	L İndisi yöntemi ile bir güç sisteminin kararsızlık kritik değerine olan yakınlığı incelenmektedir. Ayrıca gerilim kararlılığı da analiz edilebilir.
Çatallaşma analizi	Güç sistemde meydana gelen yük artışıyla sistemin denge noktalarının çatallaşması buna bağlı olarak güç sisteminde kararsızlık durumlarının incelenmesinde kullanılır.
Bara indirgeme analizi	Generatörlerin reaktif güç sınırları göz önünde bulundurularak bara indirgeme analizi yöntemi ile ayrık yük akışı gerçekleştiril. Böylelikle tüm baralar için gerilim ve güç değerleri tanımlanıp analiz yapılabilir.

Güç sisteminde yeni bir kaynak eklemek veya mevcut bir kaynağı değiştirmek, güç sisteminin kararlılığı, güvenilirliği ve verimliliği üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Bu nedenle, bu tür değişikliklerin etkilerini değerlendirmek ve analiz etmek için de Çizelge 4.1'de belirtilen analizlerden Yük akış analizi ve P-V (aktif güç-gerilim) eğrileri temel yöntemlerdendir. Yük akış analizi, güç sistemlerindeki gerilim profillerini hesaplamak için kullanılır. Yeni bir kaynak eklemek veya mevcut yükü değiştirmek, güç sistemindeki gerilim düşüşlerine neden olabilir. Bu, tesislerdeki ekipmanların doğru bir şekilde çalışmasını etkileyebilir. Yük akış analizi, gerilim düşüşlerini tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yük akış analizi, güç sistemi içinde aktif ve reaktif güçlerin dağılımını inceleyerek enerji kaynaklarının ve yüklerin nasıl dağıldığını göstermekle beraber mevcut güç kaynakları ve iletim hatlarının kapasitelerini aşan yük durumlarını tespit etmek için kullanılır. Yük akış analizi, güç sistemi işletiminin optimize edilmesine yardımcı olabilir. Bu, yeni bir kaynağın veya düzenlemenin mevcut sistem performansını nasıl etkileyeceğini belirlemek için kullanılmaktadır.

Diğer analiz yöntemlerinden P-V eğrileri güç sisteminin kararlılığını, gerilim profillerini, güç akışlarını ve kaynakların çalışma sınırlarını incelemek için bir diğer yöntemdir. P-V eğrileri, güç sisteminin kararlılığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu eğriler, belirli bir gerilim seviyesinde (genellikle nominal gerilimde) güç kaynaklarının maksimum aktif güç çıkışını gösterir. Güç sistemlerinde kaynaklar bu sınırların altında çalışmalıdır, aksi takdirde güç sistemi kararsız hale gelebilir. P-V eğrileri, farklı güç çıkışları için gerilim seviyelerini gösterir. Bu, belirli bir kaynağın veya kaynak kombinasyonunun güç sisteminin genel gerilim profilini nasıl etkileyeceğini anlamak için elverişli bir yöntemdir. Bu eğriler güç sistemi içindeki güç akışlarını incelemek için de kullanılır. Güç akışı analizi ile belirli

bir güç üretimi veya yük değişikliği durumunda gerilim ve güç akışlarının nasıl değişeceği tespit edilebilmektedir. Ayrıca P-V eğrileri, belirli bir kaynağın veya kaynak kombinasyonunun güç sistemi içindeki kapasitesini belirlemek için kullanılmakla birlikte, yeni bir kaynak eklemek veya mevcut kaynakların çalışma koşullarını optimize etmede kullanılabilmektedir.

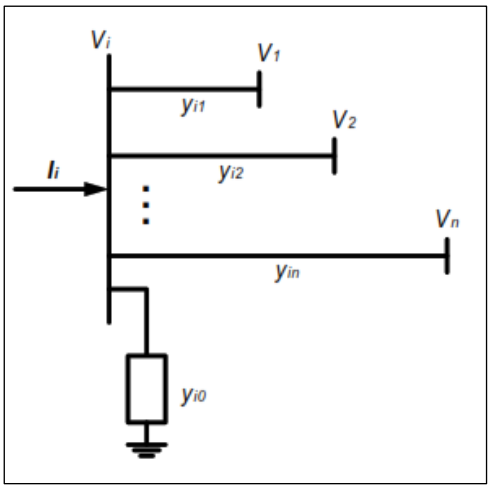
Sonuç olarak, Yük akış analizi ve P-V eğrileri, güç sistemlerinde yeni kaynakların eklenmesi veya mevcut kaynakların değiştirilmesi gibi değişikliklerin etkilerini belirlemek, güç sisteminin karmaşıklığını ve dinamiklerini anlamakla birlikte güç sistemini optimize etmek için kullanılabilecek analiz yöntemlerindendir.

4.2.1. Yük akış analizi

Yük akış analizleri sistemin o andaki genel durumunu incelemektedir. Güç sistemlerinde yük akış analizleri ile sistemde bulunan tüm baraların gerilim genlik değerleri ve açı değerleri, iletim hatları üzerinden akan reaktif ve aktif güçler, hatlar üzerinde meydana gelen kayıplar tespit edilebilir. Bu analiz gerçekleştirilmeden önce bazı kabullerle başlanır. Bu kabuller;

1. Güç sistemlerindeki üretim kaynakları ihtiyaç duyulan tüm gücü ve iletim hatlarında olabilecek kayıpları karşılamaktadır.
2. Sürekli hal koşullarında çalışan bir güç sistemi dengeli bir şekilde yüklenmiş üç fazlı sistemdir.

Burada kullanılan güç ifadeleri doğrusal olmayan eşitliklerdir ve bu yüzden eşitliklerin çözümünde iki yaklaşım sıklıkla kullanılmaktadır. İlk yaklaşım Gauss-Seidel, ikinci yaklaşım ise Newton Raphson algoritmalarıdır [94]. Bu yaklaşımlardan Newton Raphson algoritmasına göre akış denklemlerini oluşturabilmek adına *i* adet baraya sahip örnek bir güç sistemi Şekil 4.4'teki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.4. Bara sayısı *i* olan bir güç sistemi [8]

Örnek şekildeki gibi bir güç sisteminde Kirchhoff akımlar kanunu uygulanır ise baraya giren akımlar;

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \ \ldots\ldots + y_{in}(V_i - V_n) \tag{4.9}$$

şeklinde ifade edilecektir. Burada admitans değerleri Eş.4.10'da ifade edildiği gibidir.

$$Y_{ii} = y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \ldots + y_{in} \tag{4.10}$$
$$Y_{i1} = -y_{i1}$$
$$Y_{i2} = -y_{i2}$$
$$Y_{in} = -y_{in}$$

Admitaslar Eş.4.9'da yerine yazıldığında akım değerini Eş. 4.11 ve Eş. 4.12 ile hesaplayabiliriz.

$$I_i = Y_{ii}V_i + Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \ldots. + Y_{in}V_n \tag{4.11}$$

veya

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=0 \\ k\neq 1}}^{n} Y_{ik}V_k \tag{4.12}$$

i. baradan hatta verilen aktif ve reaktif güçler yazılırsa

$$P_i - Q_i = V_i I_i$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4.13)$$

Eş.4.12 ve Eş.4.13 birleştirildiğinde,

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=0 \\ k\neq 1}}^{n} Y_{ik}V_k = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4.14)$$

Olacaktır. Bu eşitlikten baraya ait gerilim değeri bulunmaktadır.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=0 \\ k\neq 1}}^{n} Y_{ik}V_k\right] \quad (4.15)$$

Eş.4.14'ten verilen güçler bulunursa aşağıdaki Eş.4.16 elde edilecektir.

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2|Y_{ii}|cos\theta_{ii} + j|V_i|^2|Y_{ii}|sin\theta_{ii} + \sum_{\substack{k=0 \\ k\neq 1}}^{n}|Y_{ik}|\,|V_i||V_k|cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) +$$

$$j\sum_{\substack{k=0 \\ k\neq 1}}^{n}|Y_{ik}|\,|V_i||V_k|sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.16)$$

Bu eşitliklerde,

$$Y_{ii} = |Y_{ii}|\angle\theta_{ii}$$
$$Y_{ik} = |Y_{ik}|\angle\theta_{ik}$$
$$V_i = |V_i|\angle\delta_i$$
$$V_i^* = |V_i|\angle -\delta_i$$
$$V_k = |V_k|\angle\delta_k$$

Reel kısımlar ve sanal kısımlar ayrıldığında güç sisteminde baraya giren veya çıkan aktif güçler Eş.4.17 ve reaktif güçler Eş.4.18 aşağıdaki gibi elde edilir [95]

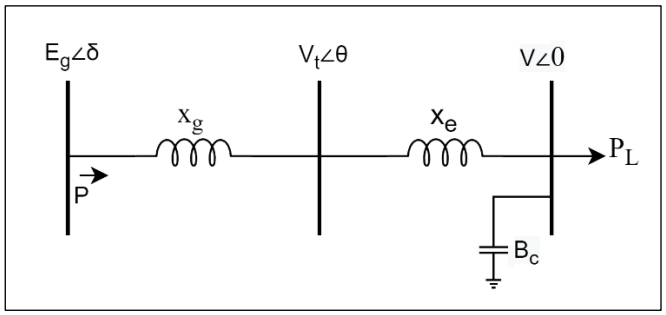
$$P_i = \sum_{k=1}^{n}|Y_{ik}|\,|V_i||V_k|cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.17)$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^{n}|Y_{ik}|\,|V_i||V_k|sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.18)$$

Bu eşitlikler kullanılarak bir güç sitemindeki tüm güçler ile birlikte sistemdeki kayıplar da hesaplanabilir.

4.2.2. P-V Eğrileri

Güç sistemlerinde üretim kaynaklarının kapasitesi azaldığında veya sistemde yüklenmenin arması durumlarında kararlılık problemleri ortaya çıkacaktır. Güç sistemlerinde P-V eğrileri elde edilirken sabit bir güç katsayısı ile birlikte hat başı gerilimi belirli bir değerde sabit tutulmak şartıyla, hat sonunda yük barasına bağlı yük ile baradan çekilen aktif güç değeri kademeli olarak artırılır. Bu şekilde hat sonunda bulunan yük barasının gerilim genliğindeki değişim gözlenebilmektedir. Güç sistemlerinde P-V eğrileri bu yöntemle elde edilmektedir. Tek generatörlü bir yük barası eşdeğer devre modeli Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Tek generatörlü yük barası eşdeğer devresi

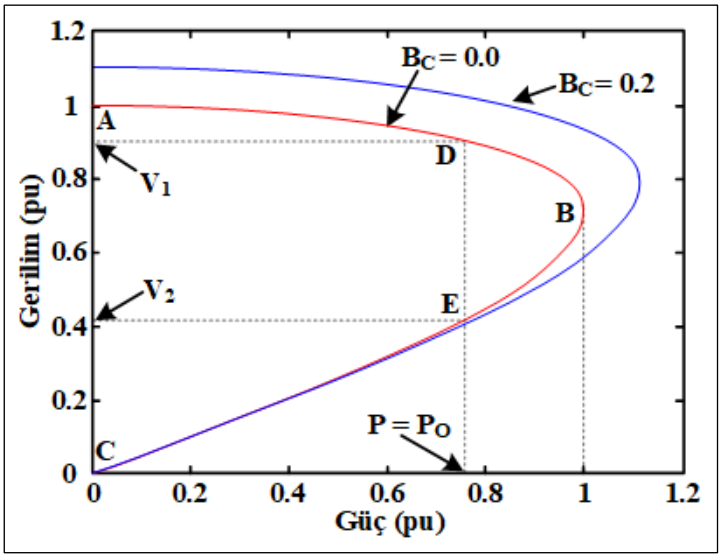
Şekil 4.5'te verilen eşdeğer devre modelinde giriş barası gerilim değeri (E_g), çıkış barasında P_L aktif güç değerine sahip bir yük ve hattın toplam seri reaktansı ($X = X_e + X_g$) görülmektedir. Ayrıca şönt kapasitörü B_c ile ifade edilmiştir. Bu eşdeğer devreden giriş gücü ve yük gerilimi sırasıyla Eş. 4.19 ve Eş. 4.20 ile hesaplanabilir.

$$P = \frac{E_g^2 sin2\delta}{2x(1-B_c X)} = P_L \tag{4.19}$$

$$V = \frac{E_g cos\delta}{(1-B_c X)} \tag{4.20}$$

Örnek bir gösterim olarak, şönt kapasitörü ifade eden B_C'nin sistemde olmadığı ve değerinin 0,2 olması durumunda elde edilen bir P-V grafiği Şekil 4.6'da görülmektedir. Burada giriş barası gerilimi Eg=1.0pu ve reaktans X=0.5pu kabul edilmektedir. Sistemde $P=P_O$ sabit bir

yük gücü için iki farklı gerilim değeri V_1 ve V_2 ile belirtilen giriş gerilimleri uygulanmıştır. Literatürde, genellikle yüksek voltajlı çözüm V_1'in kararlı olduğu, düşük voltajlı çözüm ise V_2'nin kararsız olduğunu belirtilir. Bu ifade, sistem dinamiklerine dayalı bir açıklama gerektirir. P-V eğrisinin alt kısmının (B-C) kararsız olduğunu söylemek yanlış olur. Gerçekte, B-C yayı ile belirtilen bölge "güç kontrolsüzlüğüne" karşılık gelir ve maksimum yüklenebilirlik düzeyi B noktası tarafından belirlenir. Güç sisteminde yük barasının aktif güç değeri (B noktası), düzenli olarak kademeli bir şekilde artırılmasıyla belirlenir. Bu nokta sistemin maksimum yüklenebilirlik seviyesini ifade etmektedir.



Şekil 4.6. P-V grafiği

Şekil 4.6'daki P-V grafiği göz önünde bulundurularak maksimum yüklenme oranları her bir güç barası için ayrı ayrı değerlendirilebilmektedir. Böylece, sistemin bara yük değerlerine bağlı olarak maksimum çalışma kapasiteleri tespit edilebilir [92].

Bir güç sistemi içindeki gerilimler, akımlar ve güçlerin sistem üzerindeki etkileri, yük akış analizleri ile belirlenmektedir. Burada güç sistemlerinin kararlılığını ve performansını belirlemek için DIgSILENT benzetim programında yük akış analizi, güç sistemlerinin belirli bir çalışma noktasında nasıl davranacağını anlamak için kullanılır. Bu analiz, güç sistemlerindeki gerilim düşüşlerini, güç kayıplarını, hat yüklenmelerini ve diğer performans özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır.

5. METASEZGİSEL ALGORİTMALAR ve OPTİMİZASYON

Metasezgisel algoritma teknikleri son dönemlerde popüler optimizasyon araçları olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmalardan Genetik Algoritma, Karınca Kolonisi Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması gibi algoritmalar sadece bilgisayar bilimi alanında değil aynı zamanda birçok farklı alanda kullanımı yaygınlaşmıştır. Farklı alanlarda teorik çalışmalarla birlikte birçok optimizasyon tekniği uygulama alanı bulmuştur. Bu şekilde metasezgisel algoritmaların yaygın kullanımı dört hususa dayanır. Özellikle basitlik, esneklik, bağımsız mekanizma ve yerel optimumdan kaçınma gibi sebepler bu algoritmaların tercih sebebi olmuştur [51].

Metasezgisel yöntemler oldukça basittir. Çoğunlukla çok basit kavramlardan ilham almışlar. İlhamlar tipik olarak fiziksel olaylar, hayvanların davranışları veya evrimsel kavramlarla ilgilidir. Bu algoritmada esneklik, algoritmanın yapısında herhangi bir özel değişiklik olmaksızın metasezgisel yöntemlerin farklı problemlere uygulanabilirliğini ifade eder. Metasezgisel yöntemler, sorunları çoğunlukla kara kutular olarak kabul ettikleri için farklı sorunlara kolayca uygulanabilir. Başka bir deyişle, bir metasezgisel yöntem için yalnızca bir sistemin girdileri ve çıktıları önemlidir. Bu nedenle, bir optimizasyon probleminin çözümü için ihtiyaç olan tek şey, problemini metasezgisel için nasıl temsil edeceğini bilmektir.

Metasezgisel yöntemlerin çoğunluğu türetmeden bağımsız mekanizmalara sahiptir. Gradyan tabanlı optimizasyon yaklaşımlarının aksine, metasezgisel yöntemler sorunları stokastik olarak optimize eder. Optimizasyon süreci rastgele çözümler ile başlar ve optimumu bulmak için arama uzaylarının türevini hesaplamaya gerek yoktur. Bu, meta sezgiselleri pahalı veya bilinmeyen türev bilgileriyle gerçek problemler için oldukça uygun hale getirir. Son olarak, metasezgisel yöntemler, geleneksel optimizasyon tekniklerine kıyasla yerel optimumdan kaçınmak için üstün yeteneklere sahiptir. Bunun nedeni, yerel çözümlerde durgunluktan kaçınmalarına ve tüm arama uzayını kapsamlı bir şekilde aramalarına izin veren metasezgisel yöntemlerin stokastik doğasından kaynaklanmaktadır. Gerçek problemlerin arama alanı genellikle bilinmez ve çok sayıda yerel optimum ile çok karmaşıktır, bu nedenle metasezgisel yöntemler bu zorlu gerçek problemleri optimize etmek için iyi seçeneklerdir.

Optimizasyon süreci, var olan herhangi bir kısıtlamayı kaldırmadan mevcut kaynakları kullanmak için en iyi yöntemi belirleme süreci olarak tanımlanabilir. Bu süreç birden fazla adımdan oluşmaktadır:

- Sistem modelini matematiksel olarak tanımlama
- Değişkenlerini ve kısıtlamalarını belirleme
- Amaç fonksiyonunu oluşturma
- Amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize etmek.

Bir sistemin optimizasyonu, kuantum tabanlı teknikler, metasezgisel tabanlı yaklaşımlar ve çok amaçlı tabanlı teknikler gibi uygun yöntemlerden herhangi biri kullanılarak gerçekleştirilebilir [96]. Ancak, karmaşık optimizasyon yöntemlerinin asıl amacı, bir çözüm bulmaktır. En azından bir çözüm bulunduğunda, onu geliştirmek için çok sayıda yöntem kullanılabilir. Metasezgisel optimizasyon algoritmalarının oluşturulması ve geliştirilmesinin arkasındaki temel ilke budur. Metasezgisel algoritmalar, her iterasyonda bir minimizasyon veya maksimizasyon yaklaşımı kullanarak tek veya birçok çözümle çalışabilir. Bu algoritmalar, özellikle geleneksel algoritmaların kısıtlamalarını aşabilecek belirsizliklerin sisteme dahil edilmesiyle, problemde artan karmaşıklığının üstesinden gelmek için her iterasyonda bir minimizasyon veya maksimizasyon yaklaşımı kullanarak tek veya birçok çözümle çalışabilir. Birçok çalışma incelendiğinde bu algoritmaların avantajlarını şu şekilde sıralamak mümkündür [97, 98].

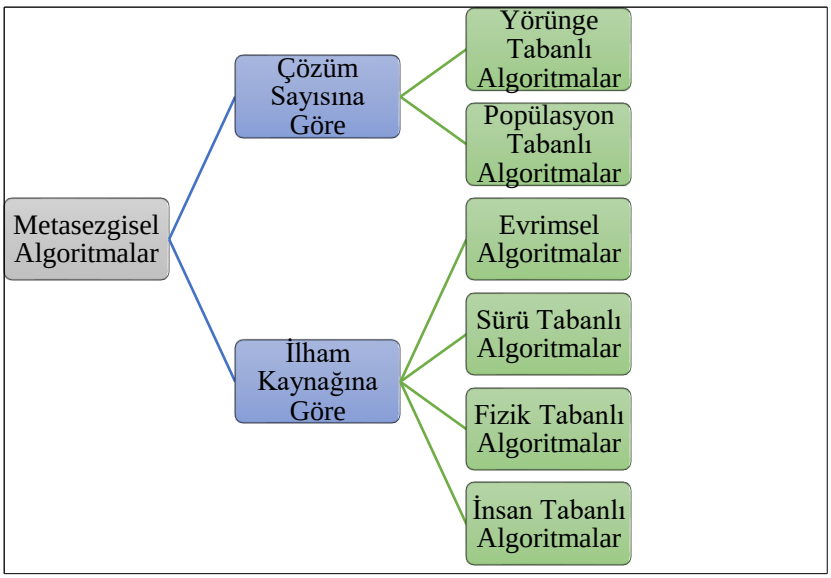
- Bu algoritmaların temel prensibi, basit yerel arama tekniklerinden karmaşık öğrenme süreçlerine kadar herhangi bir özel durum için soyut olarak açıklanabilir.
- Metasezgisel algoritmalar, arama uzayını verimli bir şekilde taramak için arama sürecini yönlendirme ve yönetme yollarıdır. Bu metotta global ve lokal arama yöntemlerini dengeleyen güncelleme katsayılarını kullanırlar. Katsayılar global arama yeteneğini yükselterek büyük değerlerle başlatılırken optimizasyon işleminin sonunda, en iyi çözüme yakınsamak için bu katsayı küçük olmalıdır.
- Metasezgisel algoritmalar, daha üst düzey bir yaklaşımla tasarlanan buluşsal yöntemler biçiminde alana özgü bilgileri kullanabilmektedir.

- Algoritmadaki formülasyonda amaç fonksiyonu, gradyan veya Hessian matrisini içermez. Bu nedenle Metasezgisel Algoritmalar, optimuma yakın çözümler sunan, deterministik olmayan algoritmalardır.
- Bu algoritmalar, ele alınan problemin çözümü için bir dizi parametre ve arama uzayında yerel çözümlere takılmayı önleyecek teknikler içermektedir. Çözülen problem ele alındığında, daha iyi performans sağlamak için bu parametreler seçilmelidir [99].

Her bir metasezgisel algoritmanın kendi mekanizması vardır. Çok sayıda metasezgisel algoritma olduğundan ve bu algoritmalar arasında farklı yöntemler vardır [100].

5.1. Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Sınıflandırılması

Metasezgisel bir algoritma, küresel optimum çözümü elde etmesine izin veren keşif ve kullanım yeteneklerine sahip olmalıdır. Başlıca özellikleri, çözüm için geniş arama alanlarını hızlı bir şekilde keşfetme, global çözümleri bulma ve yerel optimumlarda kalma yeteneğidir. Keşif, arama uzayını genişletme kapasitesiyken, kullanım yetenekleri ise çevredeki çözümlerden en uygun çözümü bulma kapasitesidir. Mevcut algoritmalar ile arasındaki temel fark, keşif ve kullanım arasında denge kurma girişimleridir. Metasezgisel algoritmaları çözüm sayısına ve ilham kaynağına göre Şekil 5.1'de görüldüğü gibi gruplandırmak mümkündür [101].



Şekil 5.1. Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması

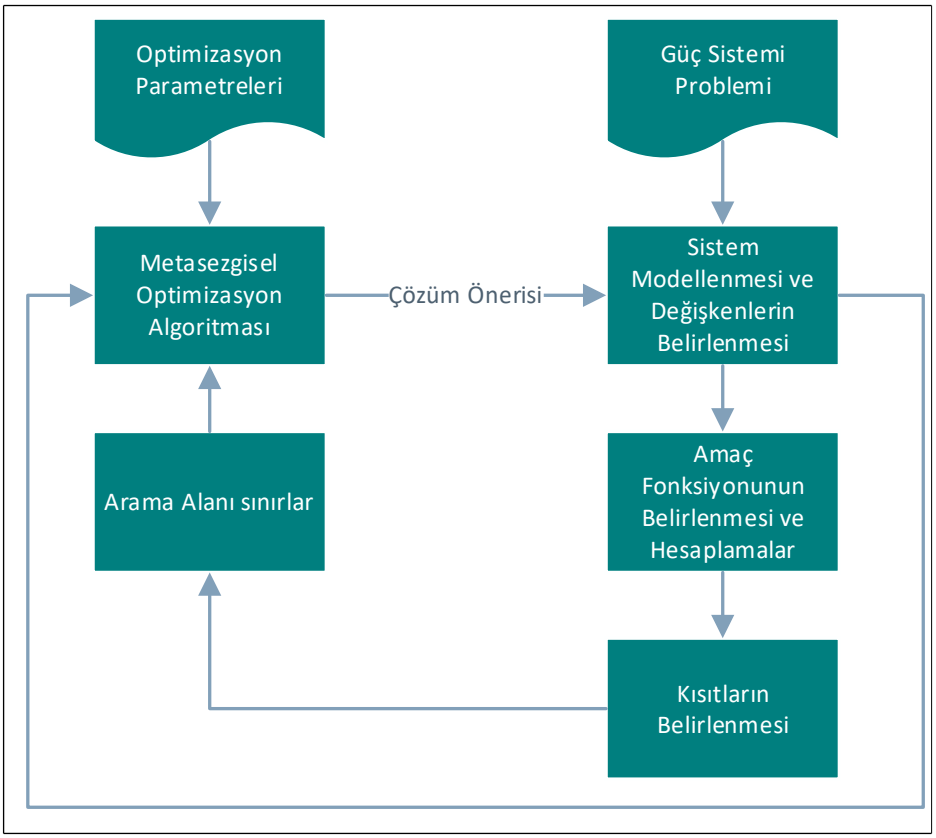
Metasezgisel algoritmalar çözüm sayısına göre; yörünge tabanlı ve popülasyon tabanlı olmak üzere iki alt kategoriye ayrılabilir. Her bir algoritmik basamakta kullanılan geçici çözümlerin sayısı, bu iki kategori arasındaki birincil farkı oluşturmaktadır [97]. Yörünge tabanlı algoritmalar, tek bir çözümle başlar ve bu çözümü her tekrarda yakınlarda bulunan daha iyi bir çözümle değiştirir. Popülasyona dayalı algoritmalar ise aynı görevi ele almak için aynı görevde bir grup olası çözüm kullanır. Popülasyon rastgele başlatılır ve onu geliştirmek için tekrar eden bir yöntem kullanılır. Her iterasyondan sonra seçkincilik stratejisine dayalı olarak yeni bir nesil oluşturulur. Son nesilden en iyi adapte olan bireyler yeni nesle taşınarak çözüm aranır. Metasezgisel algoritmaları, Şekil 5.1 de gösterildiği üzere ilham kaynağına göre ise dört farklı sınıfa ayırabiliriz. Bunlardan;

- Evrimsel algoritmalar, genetik rekombinasyon, mutasyon ve doğal seçilimi içeren, biyolojik evrimden ilham alan algoritmalardır.
- Sürü tabanlı algoritmalar, birden çok bireyin kolektif davranışlarının gözlemlenmesinden ve bu davranışlardan ilham alırlar. Her birey, sürünün kolektif deneyimine dayanarak kendilerini geliştirmek için başkalarıyla ilişki kurmak ister.
- Fizik tabanlı algoritmalar, yerçekimi, elektromanyetizma ve momentum gibi fiziksel kavramlara dayalı algoritmalardır.
- İnsan tabanlı algoritmalar ise insanların sosyal eylemlerine dayalı algoritmalardır [101].

5.2. Metasezgisel Algoritmalar ve Güç Sistemlerine Uygulanması

Güç sistemleri, değişken parametrelerde çalışan doğrusal olmayan sistemlerdir. Sistemde bulunan üretim birimleri ve yüklerin devreye alınıp çıkarılmasına bağlı olarak sistem parametreleri değişkenlik gösterir. Bu nedenle, lineer olmayan, zamana bağlı olarak değişen yük miktarı ve üretim miktarı güç sistemlerinin işletilmesinde, gerilim kararlılığını analiz etmede önemli bir ölçüt olmaktadır. Bu kararsızlıkların birçoğunun analizinde ve çözümünde Metasezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Optimizasyon algoritmalarını bir güç sisteminde kullanırken öncelikle problem belirledikten sonra, optimize edici tarafından sağlanan aday çözümleri değerlendirmek için dikkate alınan güç sisteminin bir modeli gereklidir. Daha sonra amaç fonksiyonu istenilen hedeflere göre belirlenmelidir. Eşitlik kısıtlamaları, sistem özelliklerine göre belirlenirken bu kısıtlamalar optimizasyon arama alanı sınırlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Ardından, optimize edici aday çözümleri modele gönderir. Amaç fonksiyon bloğu, çıktılarına bağlı olarak

uygunluğu hesaplar ve her çözümün uygunluğuna dayalı olarak aday çözümleri güncellemek/denemek için optimize ediciye gönderir. Bu tekrar, uygunluk değerinin son iterasyon durma kriterine ulaşana kadar tekrarlanır. Güç sisteminde meydana gelen problemin çözümü üzerine uygulanacak bir optimizasyon algoritmasındaki adımlar Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Güç sistemi kararlılık problemlerine metasezgisel algoritmalar ile yaklaşım

Bir güç sisteminin öncelikli amacı, kullanıcılara güvenli ve kararlı enerji sağlamak, olası problemlere çözüm getirmektir. Bu sistemlerde generatörün aktif gücü, kompansatörün reaktif gücü ve bara voltajı gibi çeşitli sistem faktörleri kontrol değişkenleridir ve bağımsız değişken olarak düzenlenebilirlerken güç akışlarını ve sistemin kararlılığını doğrudan etkilerler [102]. Yük barasının gerilimleri, reaktif güç ve hatlardaki güç akışları gibi diğer değişkenler ise bağımlı değişkenler olarak dahil edilmektedir [103–105]. Kontrol değişkeni kombinasyonlarını değiştirmek, sistemde kararsızlığa yol açabilir, yalnızca belirli kombinasyonlar ile önceden tanımlanmış hedeflere ulaşılmasını sağlamaktadır. İstenen durumu sağlayan en iyi kombinasyonların belirlenmesi, optimal güç akış problemi (Optimum Power Flow-OPF) sorununun çözülmesiyle elde edilebilir [106]. Amaç

fonksiyonuna bağlı olarak kontrol değişkenlerinde optimum ayarlamalar yaparak, sistem kısıtlarını da göz önünde bulundurarak, kaynak tüketimini azaltma, güç kaybını azaltma, voltaj sapmasını azaltma gibi sorunların üstesinden gelmek için hem deterministik (geleneksel) hem de metasezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılabilir [107]. Gradyan, Newton yaklaşımı, doğrusal programlama ve ikinci dereceden programlama, OPF konularına uygulanan klasik optimizasyon yöntemlerine örnek olarak verilebilir.

Güç akış problemlerinde optimizasyon değişkenleri *i*, generatörün aktif gücü PG_i , gerilimi V_{gi}, şönt Var kompanzasyonu QC_i ve tarafo kademeleri T_i ile ifade edilmektedir. Ayrıca salınım/gevşek bara (Slack Bus) gücü PG_{sl}, yük barası (Load Bus) gerilimi VL_i, reaktif güç QG_i, iletim hatlarındaki yükler Sl_i ile gösterilmektedir. Bir güç sisteminde optimum güç akış optimizasyonu için x ve y vektörleri Eş. 5.1'de gösterilmiştir.

$$\begin{cases} x = \left[PG_2 \dots PG_{ng}, VG_1 \dots VG_{ng,} T_1 \dots T_{nt,} QC_1 \dots QC_{nc}\right] \\ y = \left[PG_1 (= PG_{sl}, VL_1 \dots VL_{nl,} QL_1 \dots QG_{ng,} Sl_1 \dots Sl_{ntl}\right] \end{cases} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte *ng* generatör sayısı, *nt* trafo sayısı, *nc* Var kompansatör sayısı, *nl* yük sayısı ve *ntl* iletim hattı sayısını vermektedir. Eşitlik kısıtlamaları Eş.5.2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{cases} PG_i - P_{load_i} - V_i \sum_{j=1}^{nb} V_j \left(\alpha_{ij} \cos\left(\theta_{ij}\right) + \beta_{ij} \sin\left(\theta_{ij}\right)\right) = 0 \\ QG_i - Q_{load_i} - V_i \sum_{j=1}^{nb} V_j \left(\alpha_{ij}\, sin\left(\theta_{ij}\right) + \beta_{ij} \cos\left(\theta_{ij}\right)\right) = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Eşitlik kısıtlamasında *nb*, bara sayısıdır. P_{load_i} ve Q_{load_i}, yükün aktif ve reaktif gücü ifade ederken θ_{ij}, bara açısıdır. α_{ij} ve β_{ij}, giriş matrisinden çıkarılan gerçek ve imajiner kısımları temsil etmektedir. Optimum güç akışında Eşitsizlik kısıtlamaları ise Eş.5.3 ile ifade edilmektedir.

$$
\begin{aligned}
&PG_i^{min} \le PG_i \le PG_i^{max}, i = 1 \cdots ng \\
&VG_i^{min} \le VG_i \le VG_i^{max}, i = 1 \cdots ng \\
&T_i^{min} \le T_i \le T_i^{max}, i = 1 \cdots nt \\
&QC_i^{min} \le QC_i \le QC_i^{max}, i = 1 \cdots nc \\
&VL_i^{min} \le VL_i \le VL_i^{max}, i = 1 \cdots nl \\
&QG_i^{min} \le QG_i \le QG_i^{max}, i = 1 \cdots ng \\
&Sl_i \le Sl_i^{max}, i = 1 \cdots ntl
\end{aligned}
\tag{5.3}
$$

Bu eşitliklerle işletme maliyeti için amaç fonksiyonu Eş.5.4'teki gibi oluşturulabilir.

$$minF(x,y) = min \sum_{i=1}^{ng} PD_i^2 . c_{1_i} + PD_i . c_{2_i} + c_{3_i} \tag{5.4}$$

Burada c maliyet katsayılarını belirtmektedir. İndirgemek için amaç fonksiyonunu Eş.5.5'teki gibi formülize edecek olursak

$$minF(x,y) = min \sum_{i=1}^{ntl} P_{loss_i} \tag{5.5}$$

iletim hattındaki güç kayıpları P_{loss_i}, ile ifade edilmektedir. Bu kayıplar Eş.5.6'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{loss_ab} = \alpha_{ab}(V_a^2 + V_b^2 - 2V_aV_b\cos(\theta_a - \theta_b)) \tag{5.6}$$

burada a ve b baraları ifade ederken, α_{ab} a ve b baraları arasındaki iletim hattı iletkenliğini, V_a ve V_b voltajı ve θ_a ve θ_b ise baralar arasındaki açıları gösterir.

Gerilim profili geliştirme için amaç fonksiyonu Eş. 5.7'deki gibi formüle edilebilir

$$minF(x,y) = min \sum_{i=1}^{nl} \left| V_i^{ref} - V_i \right| \tag{5.7}$$

Burada V_i, i. bara gerilimidir ve V_{ref} referans değeri göstermektedir.

Bir güç sisteminde bu eşitlikler kullanılarak, yük akışları, bara gerilimleri, iletim hatlarında meydana gelecek kayıplar , üretim kaynaklarının aktif-reaktif güç oranları, optimum güç akışı (OGA) gibi fonksiyonlar çözümlenebilmektedir. Optimum güç akışı, güç sistemlerindeki maliyetleri minimize etmek veya belirli bir kriteri en iyi şekilde sağlamak için kullanılır. Son dönemlerde yapılan çalışmalar incelendiğinde standart ve acil durumlarda voltaj stabilitesinin iyileştirilmesi, maliyetin düşürülmesi için çeşitli objektif fonksiyonların değerlendirildiği görülmektedir [101]. Enerji üretim maliyeti, güç kaybı ve gerilim sapmaları dahil olmak üzere çok amaçlı bir OGA sorunu farklı metasezgisel algoritmalarla çözülmüştür [108]. Bu OGA problemlerinin çözümünde Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması (KKA) [109–112] ve Bozkurt Optimizasyon Algoritması (BOA) gibi sürü tabanlı optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır[113].

Enerji sistemlerinde dağıtılmış kaynakların sisteme dahil edilmesiyle farklı güç sistemi problemleri ortaya çıkmaktadır. Yetersiz üretim, kaynak seçimi, kaynak kapasiteleri ve yer seçiminden kaynakları olan bu problemler; aşırı güç kayıplarına, zayıf voltaj profillerine ve harmonik yayılmalara neden olabilir [114]. Bu nedenle, üretim kaynaklarının optimal boyutunun ve konumunun belirlenmesi gereklidir[115]. Bağlantı noktasının optimize edilmesi ile, kaynağın bağlanacağı baraların belirlenmesi mümkündür. Uygun lokasyon belirlenmesi ile güç kaybı gibi güç sistemi problemlerinin çözümü sağlanabilmektedir.

Birçok araştırmacı, üretim kaynaklarının en iyi yerini ve boyutunu seçmek için çeşitli yöntemler denemişlerdir. Analitik [116–118], doğrusal [119] ve ikinci dereceden programlama [120] yöntemleri ile çözüm sunmaya çalışmışlardır. Son zamanlarda ise metasezgisel optimizasyon algoritmaları, üretim kaynaklarının optimal boyutlandırılması ve yerleştirilmesinde daha fazla popülerlik kazanmıştır.

Güç kayıplarını azaltmak, yük profillerine göre üretim planlamalarının yapılması gibi uygulamalarda yine sürü tabanlı optimizasyon algoritmalarından Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO) [121] ve Bozkurt Optimizasyon Algoritmasını (BOA) kullanmışlardır[122].

Çizelge 5.1’de üretim kaynaklarının optimal boyut ve konumunun tayini için kullanılan bazı metasezgisel algoritmalar gösterilmektedir [101].

Çizelge 5.1. Bazı Metasezgisel Algoritmalar ve Örnek Uygulamaları

Algoritma Adı	Problem/Hedef/Çözüm
Genetik Algoritma (GA)	Kaynak türü ve günlük ortalama aktif güç kayıplarını azaltmak için [123] Güç kalitesi iyileştirmesi dikkate alınarak kaynak konum ve boyutu seçimi [124]
Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO)	Güç arzını dikkate alarak, yıllık güç kayıplarını en aza indirmek için üretim kaynaklarının konumu ve boyutunun belirlenmesi [125] Toplam güç kayıplarını ve gerilim profilinin iyileştirilmesi kaynak konumu ve boyutunun belirlenmesi [126]
GA Tabanlı Tabu Arama Algoritması (GA-TA)	Bağımsız özel sektörlerde dağınık üretim kaynaklarının en iyi konumunun belirlenmesi [127]
Yerçekimi Arama Algoritması (YAA)	Dağıtım ağındaki fiyatlandırmaların yapılması ve gerilim profillerinin iyileştirilmesi [128] Güç kayıplarını, harmonik bozulmayı azaltmak için radyal dağıtım ağında üretim kaynaklarının uygun konumunu ve boyutunun bulunması [129]
Bakteri Yiyecek Arama Algoritması (BYA)	Farklı bara modellerinde güç kayıplarının azaltılması ve gerilim profilinin iyileştirilmesi [130]
Geliştirilmiş Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (GCAPSO)	Dağıtım ağındaki güç kaynakları için en iyi konum ve boyutun belirlenmesi [131]
Geriye dönük arama algoritması (GDA)	Radyal dağıtım ağında dağınık üretim kaynaklarının, kapasitör gruplarının ve tristör kontrollü seri kompansatörün optimum boyutlandırılması ve konumu [132]
Fuzzy-GDA (Hibrit)	Operasyonel performansın arttırılması, kayıpların azaltılması ve gerilim profilinin iyileştirilmesi hedefleri amaç fonksiyonu içerisinde yer almaktadır [133]
Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması (KKA)	Elektrik enerjisi maliyetlerini, güç kayıplarını ve trafo merkezlerinden kaynaklanan toplam emisyonları azaltmak, voltaj kararlılığının artırılması [134]
Bozkurt Optimizasyon Algoritması (BOA)	Dağıtım sistemlerinde gerilim profillerinin iyileştirilmesi ve reaktif güç kayıplarının azaltılması [122] Gerilim kararlılığının sağlanması ve kayıpların azaltılması [135] Üretim kaynağı seçimi [136]

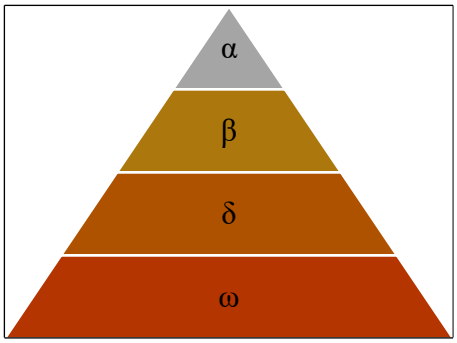
Bu örnek problem çözümleri incelendiğinde metasezgisel algoritmaların son 10 yılda güç sistemleri problemlerinde ve uygulamalarında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir.

5.3. Bozkurt Optimizasyonu Algoritması (BOA)

Metasezgisel algoritmalar tipik olarak fiziksel olaylar, hayvanların davranışları veya evrimsel kavramlarla ilgilidir. Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılmasına bakıldığında (Bknz. Şekil 5.1) sürü tabanlı algoritma sınıfına giren Bozkurt Optimizasyon Algoritması esnek yapısı, algoritmada herhangi bir özel değişiklik olmaksızın farklı problemlere uygulanabilmektedir. Bu bölümde Bozkurt Optimizasyon Algoritmasının işleyişi sunulmuştur.

5.4. Bozkurt Hiyerarşisi

Doğada bozkurtlar (gri kurt) besin piramidinde en üstte yer alırlar ve uç avcılar olarak kabul edilir. Algoritmanın esin kaynağı olan Bozkurtlar genellikle sürü olarak yaşayıp grup halinde hareket ederler. Bu gruplarda ortalama 5 ila 12 üye bulunur. Grup içerisinde katı bir sosyal hiyerarşi vardır. Bu hiyerarşi Şekil 5.3'te görülmektedir [51].



Şekil 5.3. Bozkurt hiyerarşisi [51]

Şekilde görünen piramidin en üstünde bulunan Alfa (α) grup liderlerini ifade etmektedir. Bu hiyerarşide grup liderleri, avlanma, uyku yeri, uyanış zamanı gibi durumlarda grup adına karar vericidir. Bir grupta lider olan alfa mutlaka en güçlü olmak zorunda değildir. En iyi yönetim kabiliyetine sahip grup üyesi kurt alfa olacaktır. Bu, bir grubun örgütlenmesinde, düzeninin ve disiplininin, gücünden çok daha önemli olduğunu göstermektedir. Hiyerarşide ikinci sırada bulunan Beta (β) karar alma ve diğer faaliyetlerde grup liderine yardım edenlerdir. Betanın görevi grup genelinde lider kurt alfanın komutlarını alt gruplara yaymak ve geri bildirimde bulunmaktır.

Şekilde en altta yer alan Omega(ω), grupta üst kademelerdeki kurtlara daima boyun eğmelidir. Omega, grupta önemli bir kurt değilmiş gibi gözükebilir ancak gözlemler, Omega'nın kaybedilmesi durumunda bazı örneklerde grubun iç çatışmalarla ve/veya başka sorunlarla karşılaştığını ortaya koymaktadır. Bunun nedeni, tüm kurtların şiddet, umutsuzluk ve hayal kırıklığının Omega tarafından deşarj edilmesidir. Bu, grup genelinde memnuniyetin ve hakimiyet yapısının korunmasına yardımcı olacaktır. Eğer bir kurt bir Alfa, Beta veya Omega olamazsa, ona Delta (δ) denir. Delta kurtları üst gruplar olan Alfa ve betaya boyun eğerken Omega grubuna hakimiyet göstermektedir. Delta grubunda öncüler, avcılar, kıdemliler, kıdemliler, koruyucular ve gözetleyiciler gibi grup üyeleri ve görev tanımları bulunmaktadır. Bu hiyerarşik yapının yanı sıra avlanma alışkanlıkları ve düzenleri de farklı bir davranış biçimidir. Bu davranış biçiminde; izleme, takip etme, kuşatma ve saldırma gibi aşamalar sırası ile gerçekleştiği görülmektedir.

Bu sosyal davranış hiyerarşinin matematiksel modellemesinde en iyi çözüm Alfa (α) olarak düşünülmektedir. Ardından ikinci ve üçüncü en iyi çözümler ise Beta (β) ve Delta (δ) olarak tanımlanmaktadır. Diğer tüm unsurlar ve üyeler Omega (ω) olarak kabul edilir. Bozkurt optimizasyon algoritmasında avlanma davranışı benzetimiyle sistem optimizasyonu bu α, β ve δ grupları kullanılarak yapılır. Omega kurtları ise bu grupları takip edecektir.

Bu davranış biçimin matematiksel modellemesi için farklı denklemler ve eşitlikler oluşturulmuştur. Avın grup üyeleri tarafından kuşatılması davranışını modellemek için Eşitlik 5.8 kullanılmıştır.

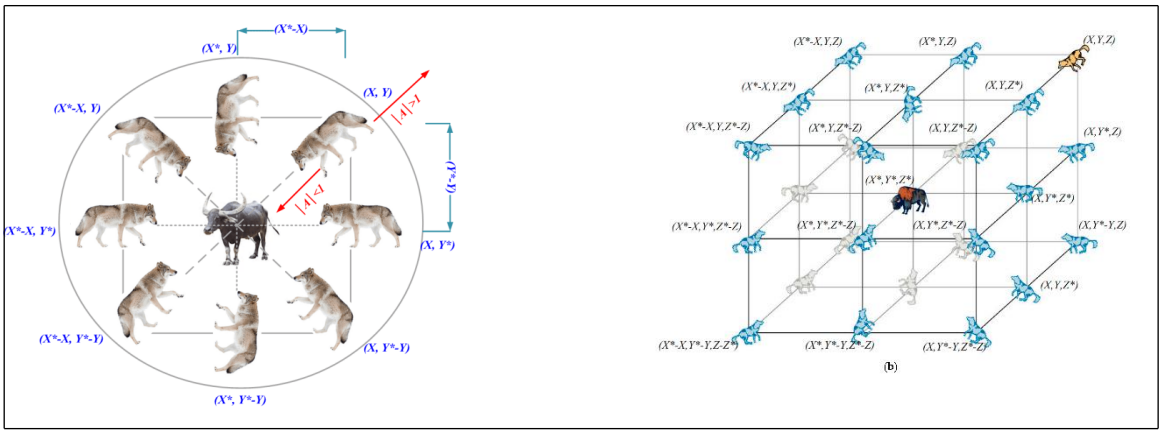
$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\overrightarrow{X_{p}}_{(t)} - \vec{X}_{(t)}\right|$$
$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{X}_{p}(t) - \vec{A}\vec{D} \qquad (5.8)$$

Bu eşitliklerde $\vec{D}$ avların birbirine olan mesafesini ifade etmektedir. $\vec{X}_p$ avın mevcut pozisyon vektörüdür. *t* tekrarı, yinelemeyi gösterir, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayılar vektörüdür ve $\vec{X}$ bozkurt konum vektörünü göstermektedir. $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayılar vektörü Eş. 5.9'daki eşitliklerle bulunur.

$$\vec{A} = 2\vec{a}\overrightarrow{r_1} - \vec{a} \qquad (5.9)$$
$$\vec{C} = 2\overrightarrow{r_2}$$

Burada $\vec{a}$ bileşenleri yinelemeler boyunca 0'dan 2'ye doğrusal olarak indirilir ve $\overrightarrow{r_1}, \overrightarrow{r_2}$ [0 1] aralığında rastgele vektörlerdir.

Kurtların 3 boyutlu uzayda olası konumları Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Buna göre $\overrightarrow{r_1}, \overrightarrow{r_2}$ ile tanımlanan rastgele vektörler, Bozkurtların Şekilde gösterilen noktalardan rastgele bir konuma gelmesi ihtimaller arasındadır. Bu durumda Bozkurt, Eş. 5.8 ve Eş. 5.9'daki ifade edilen denklemleri dürtüsel olarak kullanarak, hedefi etrafında, uzayda herhangi bir yerde mevcut konumu alabilir.



Şekil 5.4. İki ve üç boyutlu konum vektörleri ve diğer muhtemel konumlar [51].

Bozkurtların avlanmaları esnasında genellikle Alfa (α) kurt liderlik etmektedir. Kurt grubu avın konumunu belirlemekte ve onların çevresinde bir kuşatma oluşturmaktadır. Beta ve Delta kurtlar bazı durumlarda liderlik pozisyonuna eşlik etmektedirler. Bunların yanı sıra soyut uzayda, hedef(av) konum hakkında hiçbir bilgi yoktur. Bir optimizasyona benzetilecek olursa Bozkurdun avlanma davranışının matematiksel simülasyonunda Alfa en iyi sonucu vermekle birlikte, Delta ve Beta'nın hedefin potansiyel yeri hakkında diğerlerine göre daha olumlu bilgiye sahip olduğu varsayımı mevcuttur. Burada elde edilen en optimum çözümlerin üçünü saklanır. Her iterasyon zamanında her bir tekrarlamadan sonra elde edilen sonuç sürüdeki kurtlarının yerini ve en optimum arama faktörlerinin konumunu dikkate alarak, omega kurtlarda dahil tüm grubun konumlarını belirleyecek bilgiye sahip olunur. Buna göre Eş. 5.10-5.12 da belirtilen denklemler oluşacaktır [51]

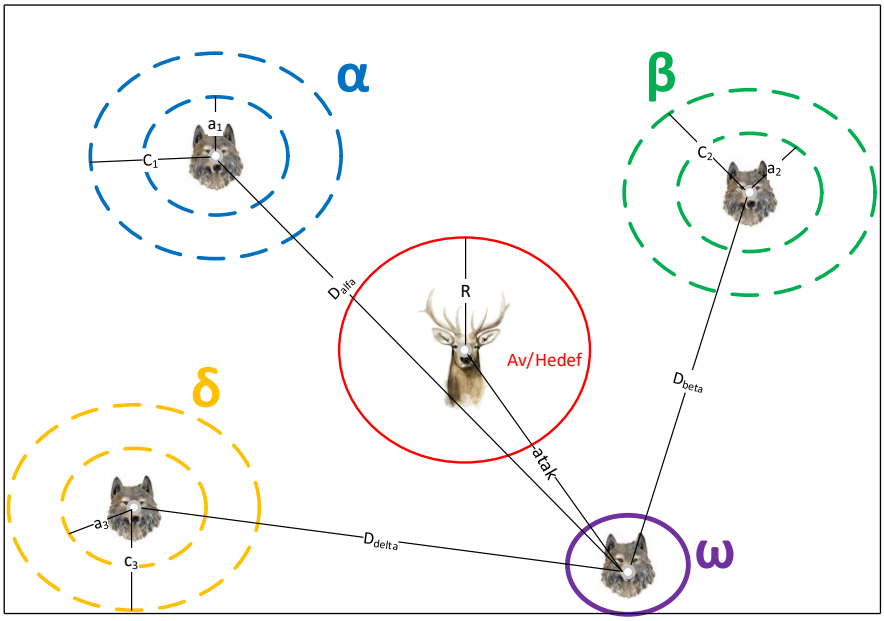
$$\overrightarrow{D_\alpha} = \left|\overrightarrow{C_1}\,\overrightarrow{X_\alpha} - \vec{X}\right|,\ \overrightarrow{D_\beta} = \left|\overrightarrow{C_2}\,\overrightarrow{X_{\beta\alpha}} - \vec{X}\right|, \overrightarrow{D_\delta} = \left|\overrightarrow{C_3}\,\overrightarrow{X_\delta} - \vec{X}\right| \tag{5.10}$$

$$\overrightarrow{X_1} = \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1}\,\overrightarrow{D_\alpha}, \overrightarrow{X_2} = \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_2}\,\overrightarrow{D_\beta}, \overrightarrow{X_3} = \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3}\,\overrightarrow{D_\delta} \tag{5.11}$$

$$\overrightarrow{X_{(t+1)}} = \frac{\overrightarrow{X_1}+\overrightarrow{X_2}+\overrightarrow{X_3}}{3} \quad (5.12)$$

Şekil 5.4, bir arama sonucunda, α, β, δ'nın konumlarını iki boyutlu uzayda göstermektedir. Son konumun, arama uzayındaki lider kurt gruplarının (α, β, δ) mevcut konumlarıyla tanımlanan bir daire içinde rastgele bir yerde olduğu görülebilir. Bir başka ifade ile bu üçlü grup hedefin yerini tespit etmekte ve gruptaki diğer avcıların konumlarını avın konumuna göre rastgele bir şekilde değiştirmektedir.

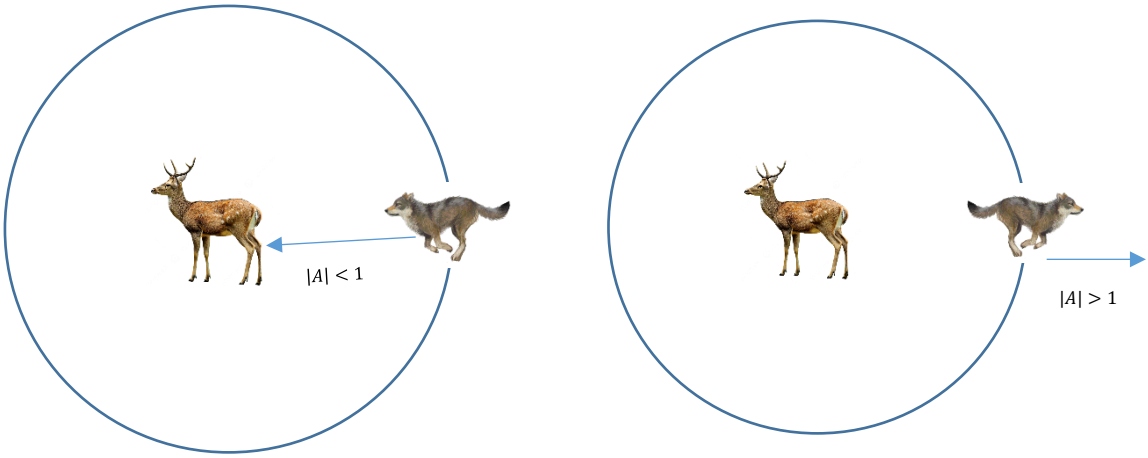
Şekil 5.5'te görüldüğü üzere, grup bekleme pozisyonuna geçildiğinde bozkurtlar, hedefe saldırarak avlanmayı sonuçlandırmaktadır. Hedefe yakınlığın matematiksel modellemesi için $\vec{a}$ vektörü değeri azaltılmadır. Buna göre A genlik salınımı da $\vec{a}$ ile azaltılmıştır. Bir başka ifade ile , $\vec{A}$, [-2$\vec{a}$, 2$\vec{a}$] arasında rastgele bir değerdir; burada $\vec{a}$ nın 2 olan değeri tekrarlar sonunda 0'a düşecektir. $\vec{A}$ rastgele değerleri ise [-1,1] arasındaki mesafede iken, bir arama faktörünün sonraki yeri, mevcut konum ile hedefin konumu arasındaki herhangi bir noktada olabilir.



Şekil 5.5. BOA konum güncellemesi

Şekil 5.6 (a)'da $|A| < 1$ değeri avcıları (α, β, δ) hedef ava saldırmaya teşvik ettiğini ifade eder. BOA algoritmasında, arama faktörlerinin konumlarını lider kurtlar α, β, δ konumlarına göre ayarlamalarına ve hedefe saldırmalarına olanak verir. Önerilen kuşatma mekanizması

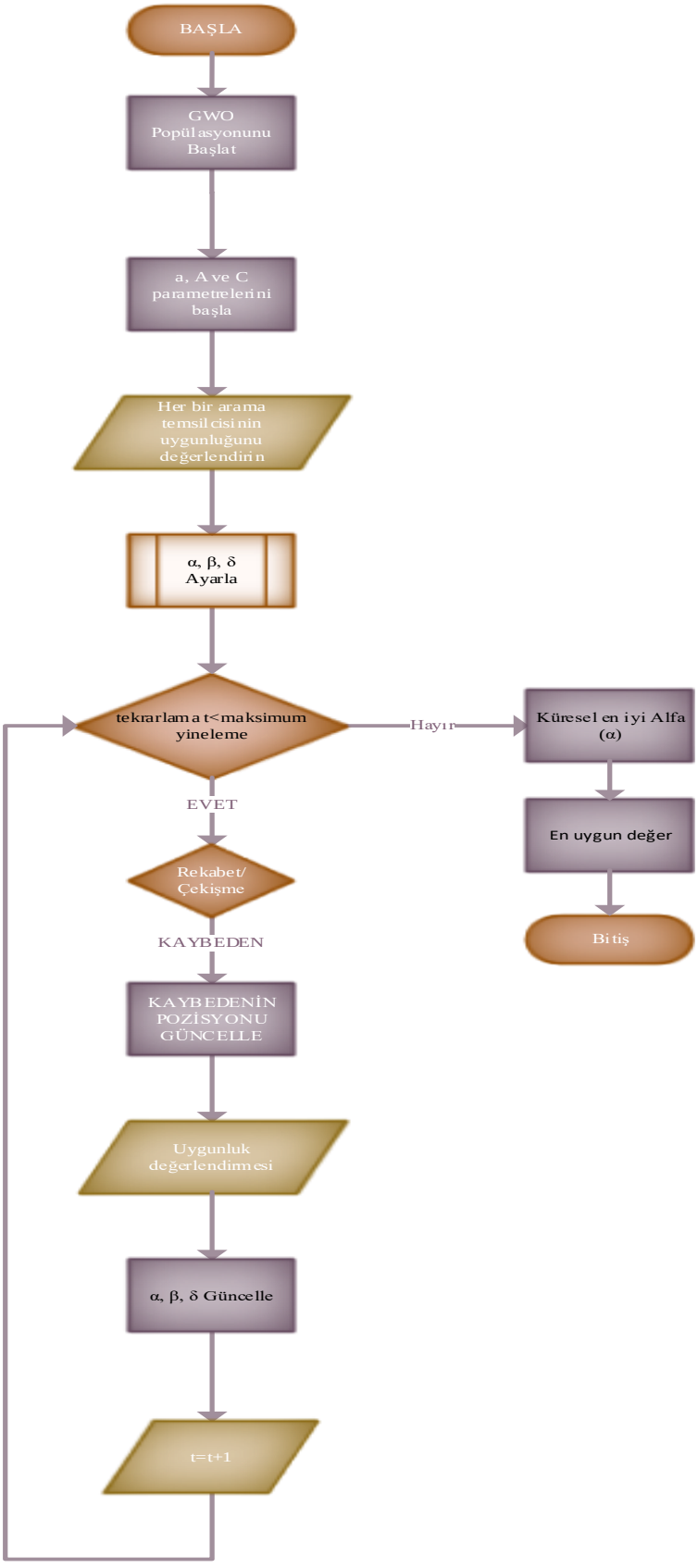
çözümü bir dereceye kadar gösterse de aramayı ve araştırmayı vurgulamak amacıyla BOA'nın daha fazla işleticiye (kısıtlara) ihtiyacı olacaktır.



(a) (b)

Şekil 5.6. Hedefe/Ava saldırma ve arayış

Bozkurtlar, temelde Delta, Beta ve Lider Alfa'nın mevcut konumlarını gözeterek avını, hedefini arar. Avı aramak için farklı kollara ayrılırlar ve/veya uzaklaşırlar, daha sonra harekete geçmek için birleşirler. Hedeften/avdan uzaklaşmanın matematiksel ifadesi için, $\vec{A}$'nın değeri 1'den büyük veya -1'den küçük rastgele değerler ile kullanılır, bu şekilde arama faktörüne yardım edebilmek adına kollara ayrılır. Bu da araştırmaya dikkat çekmekte ve BOA algoritmasının genişletilmiş alanlarda hedef, av, çözüm arama yapmasına olanak tanımaktadır. Şekil 5.6 (b)'de ise, $|A| > 1$'in avcıları hedef konumuna göre farklı dallara ayırdığını, böylelikle belirli bir av/hedef bulmak için birbirinden farklı pozisyonda olduğunu göstermektedir. Tüm bu parametrelere göre BOA algoritması işleyişinde akış şeması Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7. Hedefe/Ava saldırma ve arayış

6. GÜÇ SİSTEMLERİNİN BENZETİMİ VE GERİLİM KARARLILIĞI AÇISINDAN OPTİMİZASYONU

Güç sistemleri karmaşık ve sürekli iyileştirme sürecinde olan dinamik yapılardır. Bu dinamik yapılar benzetim programlarında modellenir çünkü bu modeller, gerçek dünyadaki karmaşık güç sistemlerini anlamak, analiz etmek, planlamak ve iyileştirmek için kullanılan güçlü araçlardır. Güç sistemlerinin analizi ve iyileştirme çalışmalarında, karmaşık ve büyük ölçekli sistemlerin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamak üç adımda gerçekleştirilebilir:

- Güç sisteminin bilgisayar ortamında benzetim modelinin oluşturulması
- Kararlılık unsurlarına göre optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi
- Benzetim modeli ile optimizasyon algoritmasının tümleşik çalıştırılması

Bu süreçte ilk adım; güç sisteminin bilgisayar ortamında benzetim modelinin oluşturulmasıdır. Benzetim programlarında modelin oluşturulması, matematiksel olarak modellemeyi ve simüle etmeyi içerir. Bir güç sistemindeki tüm bileşenler (iletim hatları, generatörler, yükler, baralar, trafo merkezleri, vb.) ayrı ayrı modellenerek bir bütün haline getirilmektedir.

İkinci adımda Güç sisteminin kararlı çalışması için kısıtların belirlenmesi ile optimizasyon algoritması geliştirilmesi ve güç sistemlerinin en iyi çalışma koşullarını bulunması hedeflenmektedir. Bu optimizasyon algoritmaları güç sisteminde kararlılığı sağlamak, kayıpları azaltmak ve diğer kısıtları yerine getirmek için kullanılır. Optimizasyon algoritması, sistemdeki değişkenleri (aktif güç üretim miktarı, hat yüklenmeleri, bara gerilim seviyeleri, vb.) ayarlar ve en iyi çözümü elde etmek için iterasyonlar gerçekleştirir.

Son olarak üçüncü adımda ise oluşturulan sistemin benzetim modeli ile geliştirilen optimizasyon algoritması bir araya getirilir. Bu, benzetim modeli üzerinde gerçekleştirilen değişikliklerin ve iyileştirmelerin optimizasyon algoritması aracılığıyla analiz edilerek değerlendirilmesi sağlanır. Algoritma, belirli hedeflere ulaşmak veya kısıtlamaları karşılamak için sistem parametrelerini ayarlar. Tümleşik çalıştırma süreci, analiz sonuçlarını ve optimizasyon sonuçlarını sürekli olarak güncelleyerek en iyi çözümü bulmak amaçlanmaktadır.

6.1. Güç Sistemlerinin Bilgisayar Ortamında Benzetimi

Güç sistemleri, karmaşık elektrik devrelerinden oluşur ve bu devreler, doğrusal olmayan özellikler ve zamanla değişen parametreler içerebilir. Bu nedenle, güç sistemlerinin modellenmesi geliştirilen çeşitli teknikler ve yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu kapsamda modeller üzerinde yük akışı analizi ile güç sistemlerindeki gerilim ve akım değerlerinin dengeli durumda nasıl dağıldığını inceleyebiliriz. Yine benzetim ortamlarında gerçekleştirilen kalıcı akım analizi güç sistemlerinde kısa devre analizleri, kısa devre akımlarının belirlenmesi ve koruma sistemlerinin tasarımı için önemlidir. Bu analizlerde, güç sistemi elemanlarının empedans değerleri kullanılarak kısa devre akımları hesaplanabilir. Güç sistemlerinin dinamik davranışları, transformatörler, generatörler, yükler gibi elemanlar arasındaki etkileşimleri analiz edilebilmektedir. Bu analiz, güç sisteminin kararlı çalışıp çalışmadığını, kararsızlık durumunda nasıl tepki verdiğini ve olası problemleri belirlemek için kullanılır.

Güç sistemlerinin karmaşıklığı göz önüne alındığında, analizlerin ve hesaplamaların elle yapılması zor ve zaman alıcı olabilir. Bu nedenle, güç sistemleri mühendisleri ve araştırmacıları tarafından çeşitli bilgisayar tabanlı yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, güç sistemleri analizlerini hızlandırmak, daha doğru sonuçlar elde etmek ve tasarım süreçlerini kolaylaştırmak için geliştirilmiştir. Bu yazılımlarla yük akışı analizi, kısa devre analizi, koruma koordinasyonu, dinamik stabilite analizi ve harmonik analiz gibi birçok analiz türünü model üzerinden gerçekleştirmek ve olası sonuçları gözlemlemek mümkündür. ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), PSS/E (Power System Simulator for Engineering), ve DIgSILENT PowerFactory güç sistemlerinde kullanılan yaygın yazılımlardır.

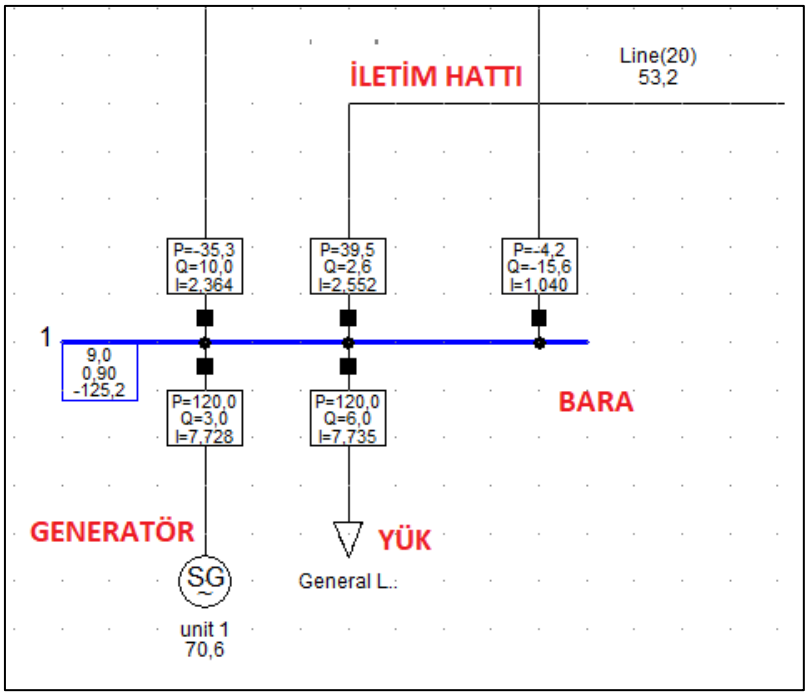
Bu yazılımlardan DIgSILENT, doğru akım uygulamaları da dahil olmak üzere yüksek ve alçak gerilim AA şebekelerinden statik ve dinamik analizlerin geliştirilebildiği bir güç sistemi analiz aracıdır [137]. Bu, güç sistemi endüstrileri, üniversiteler ve araştırma tesisleri tarafından elektrik şebekelerini analiz etmek için kullanılan yaygın olarak tanınan bir yazılımdır ve bu sistemlerin bileşenlerinin çoğunun yüksek düzeyde hassasiyetle modellenebilmesinin ana avantajıdır [138, 139].

DIgSILENT PowerFactory yazılımının diğer benzetim programlarıyla kıyaslandığında şu gibi artıları öne çıkmaktadır.

- Minimum hesaplama gereksinimleriyle çoklu güç akışlarını değerlendirmek için güç sistemi ara yüzünü kullanan gömülü bir programlama diline sahiptir.
- DIgSILENT yazılımı, diğerlerinin yanı sıra transformatörler, reaktörler, iletim hatları, generatörler, yenilenebilir enerji kaynakları ve asenkron motorlar gibi güç sistemi bileşenlerinin ayrıntılı modellenmesine izin verir. Bunlar, Newton-Raphson yaklaşımı aracılığıyla güç akışı çalışmalarına kolayca entegre edilebilmektedir.
- Kendi bünyesinde bulunan "DIgSILENT Programming Language" (DPL) aracını kullanmaktadır. Ayrıca sıra optimizasyon kodlarını uygulamak için harici programlama ara yüzlerini de kullanabilmektedir. Bu da optimizasyon stratejisinin toplam hesaplama sürelerine etki etmektedir.

6.1.1. Güç Sistemi Donanımlarının Modellenmesi

Güç sistemleri planlanırken farklı güç değerleri ve uygulamalar olduğu için, daha spesifik ve özel kullanım alanlarına yönelik birçok donanım ve cihazında modellenmesi gerekmektedir. Şekil 6.1'de bir güç sisteminde bulunan temel bileşenler görülmektedir. Her bir donanımın doğru seçimi ve düzenlenmesi, güç sisteminin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. İster büyük ölçekli isterse orta ölçekli bir güç sistemi modellenirken temel bileşenlerin modellenmesinde şu hususlara dikkat etmek gerekmektedir [140].



Şekil 6.1. Güç sistemi donanımları

Bara Modeli: Yük akışı hesaplaması için bara giriş verileri, hattan hat gerilimine göre derecelendirilir, örneğin 10 kV gibi. Bunun yanında Benzetim programlarında sistem tipi (AA veya DA) ve faz teknolojisi (ABC, yani üç fazlı denge ağı) gibi başka ağ bilgileri de gereklidir.

Hat Modeli: İletim hatlarında hesaplama için hattın modellenmesinde giriş verileri, seri direnç, seri endüktans ve şönt kapasitans gibi verilerin girilmesi gerekmektedir. Genellikle, bu değerler, uzunluk başına km olarak sistemde tanımlanmalıdır. Bunlara ek olarak kayıp faktörü ve paralel hattın sayısı, hattın akım taşıma kapasitesini ve toplam empedansını da etkileyecektir. Bu bilgilerde ağ modelinde girilmelidir.

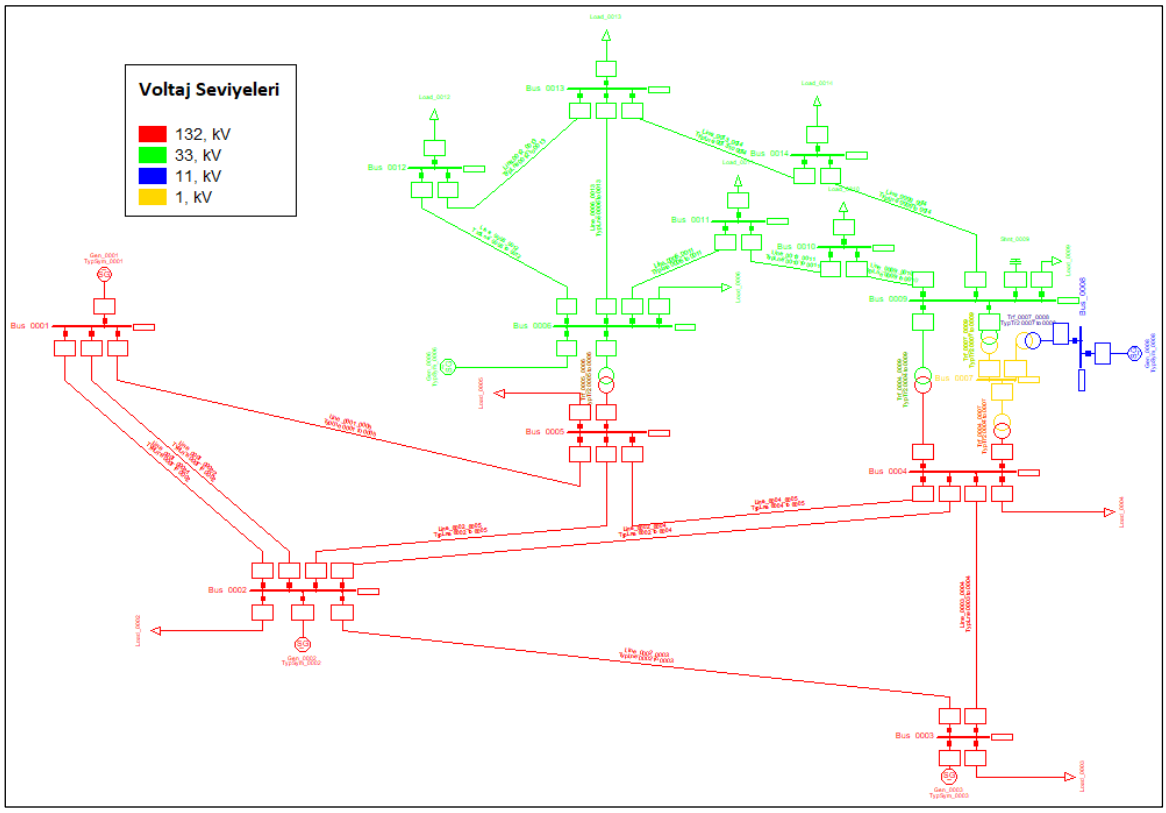
Yük Modeli: Yük, sabit empedans, sabit akım veya sabit güç gibi farklı şekillerde modellenebilir. Sabit güç yükü, voltajdan bağımsız bir modeldir ve katı voltaj özellikleriyle temsil edilir. Bu yöntem çoğunlukla yük akışı hesaplamasında kullanılır ve yük gücü voltaj değişimine bağlı olduğundan orta ve yüksek voltajlı ağ analizi için uygundur ancak düşük voltajlı ağlar için uygun değildir. Motorun aktif güç talebinin temsili için yük, gerilimle lineer olarak değişen sabit akım olarak modellenmelidir. Aydınlatma veya elektrikli ev aletleri gibi düşük voltajlı yükler için, voltajların karesiyle orantılı olarak değişen sabit

empedanslı yük modeli gereklidir. Ayrıntılı analiz için, yük modellerinden herhangi biri tek tek tüketici yükünün tüm yönlerini kapsamayacaktır.

Generatör Modeli: Yük akışı hesabı için Generatör, akım enjekte eden kaynak olarak modellenmektedir. Generatörün türünü, üretim kapasitesini, alt üst limit değerlerini, açısal değerinin doğru tanımlanması analizlerde önemli rol oynamaktadır.

6.1.2. IEEE 14 Baralı test sisteminin DIgSILENT powerfactory'de modellenmesi

DIgSILENT PowerFactory'de oluşturulan 14 Baralı Test Sistemi 1 kV, 11 kV, 33 kV ve 132 kV olmak üzere farklı voltaj seviyelerine sahip dört alandan oluşmaktadır. Bu alanların her biri Şekil 6.2'de farklı renklerle vurgulanmıştır.



Şekil 6.2. IEEE 14 Bara test sistemi DIgSILENT PowerFactory modeli

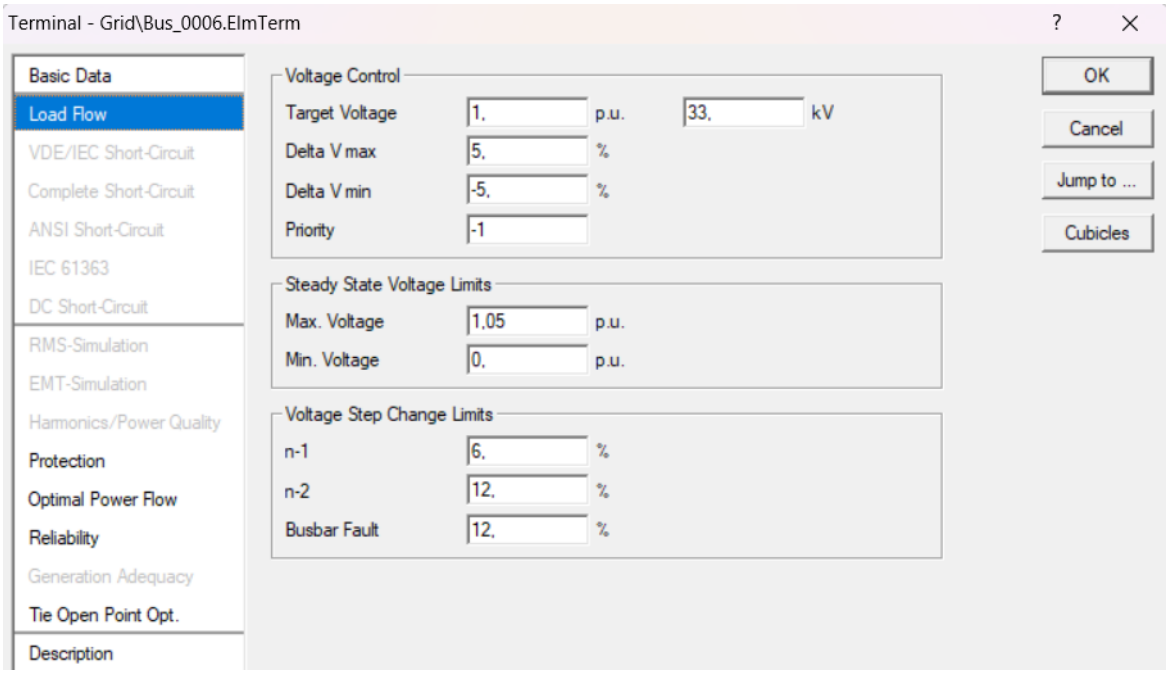
Genel olarak güç sistemi üç sınıfa ayrılır. Bu sınıflandırma, iletim voltajı seviyelerine, yani yüksek gerilim (YG), orta gerilim (OG) ve düşük gerilim (DG) şebekesine dayanır. Her şebeke kategorisiyle ilişkili gerilim seviyeleri Çizelge 6.1'de listelenmiştir.

Çizelge 6.1. Gerilim Seviyeleri ve Nominal Voltaj değerleri

Gerilim seviyeleri	Nominal Voltaj
Yüksek Gerilim (YG)	380kV (400kV) 220kV 110kV
Orta Gerilim (OG)	30kV 20kV 10kV 6kV
Düşük Gerilim (DG)	400/220V

Yüksek voltajlı şebeke sistemi, büyük elektrik gücünü şehirden şehre veya bir ülkeden diğerine uzun mesafelerde aktarmak için kullanılır ve büyük elektrik santrallerini birbirine bağlar. Orta gerilim şebekesi genellikle gücü kentsel ve kırsal alanda dağıtır ve büyük motorlara sahip endüstrilere güç sağlar. Düşük voltajlı ağ, evdeki müşterilere ve küçük endüstrilere güç sağlar. Bu model 14 Bara (Bus), 5 Generatör (Gen), 9 Yük (Load) ve 16 iletim hattından (Line) oluşmaktadır. Oluşturulan modelde referans değerler ve tanımlalar aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

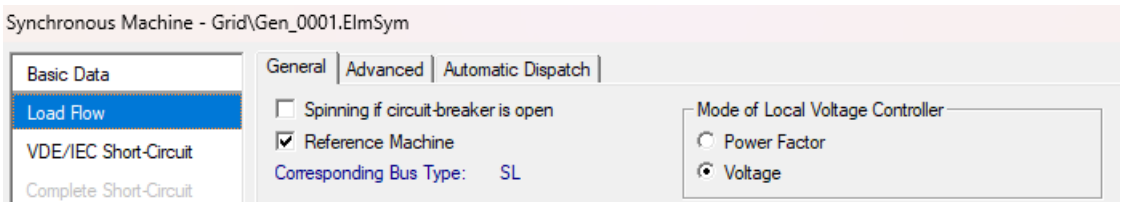
Bara (Bus): Gerilim büyüklüğü ve açısının hesaplandığı temel bir elektrik şebeke bileşenidir. Aynı zamanda yaygın olarak terminal ve bağlantı düğümü olarak da adlandırılır. Ayrıca busbarı, bağlantı kesicili tek bara sistemi ve bypass baralı çift bara sistemi gibi farklı klemens ve anahtar düzenlemelerini içeren bir istasyon olarak detaylı olarak modellemek mümkündür. Bu tanımlamalar ve referans değerlerin girildiği ara yüz Şekil 6.3'te görülmektedir. Burada bara alt üst limit değerleri *pu* cinsinden girilmiştir. PowerFactory'de "ElmTerm" adlı sınıf tarafından tanımlanır ve algoritmada bu isimle çağırılacaktır.



Şekil 6.3. Bara parametrelerinin girilmesi

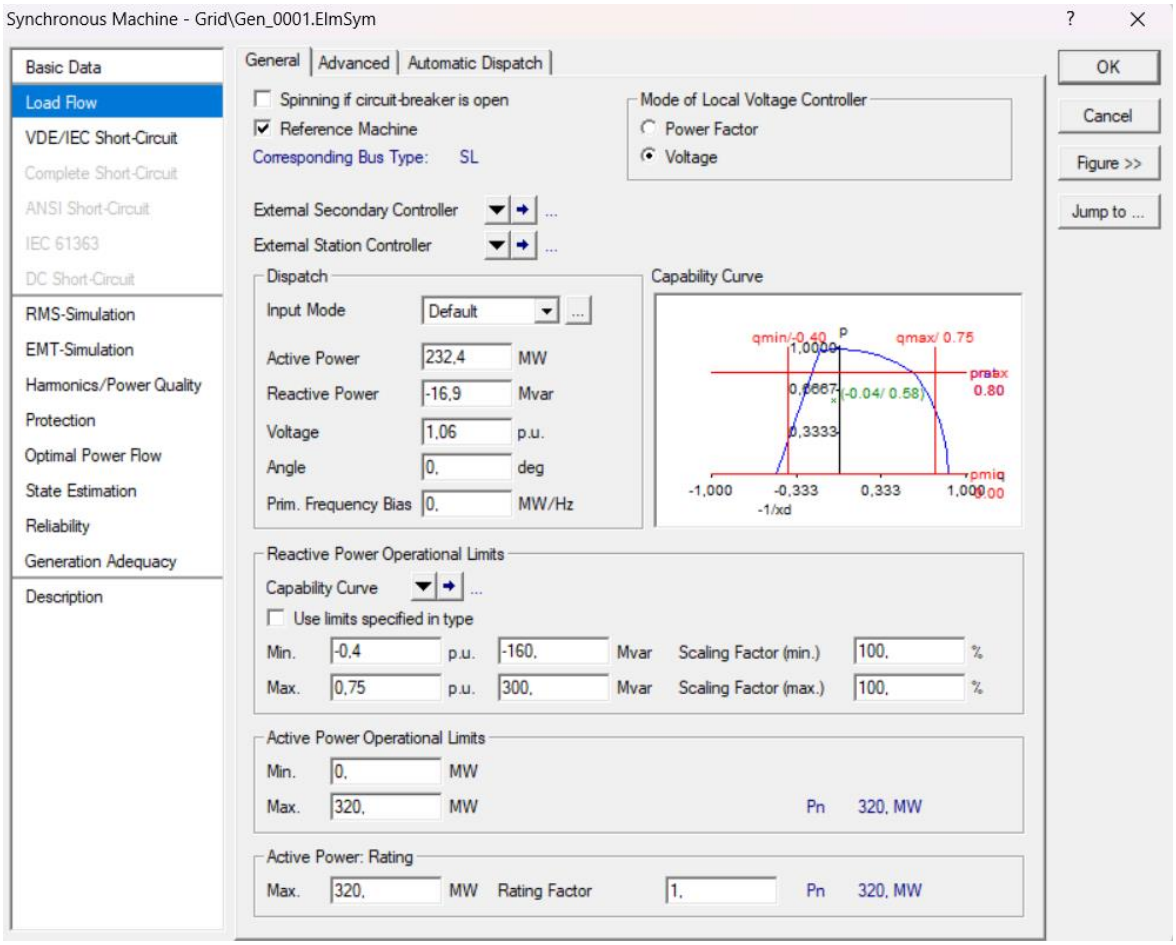
Daha önce açıklandığı gibi şebekede en az bir adet salınım barası bulunmalıdır. PowerFactory'de busbar tipi kendisine bağlı olan eleman tarafından tanımlanır. Bir barayı slack olarak ayarlamak için, ona bağlı olan üretim biriminin mod tipi SL olarak ayarlanmalıdır. Giriş verisi olarak gerilim büyüklüğü ve açı değerleri gereklidir.

Kaynak/Generatör : Generatörler, voltaj büyüklüğünü ve baraya aktif güç enjeksiyonunu kontrol eden voltaj kontrollü kaynaklar olarak modellenmiştir. Generatöre bağlı bara, genel olarak PV bara olarak adlandırılır. Şekil 6.4'te görüldüğü gibi şebeke içinde, Generatörlerden en az biri referans makine olarak konfigüre edilmelidir, yani gerilim büyüklüğünü ve açısını kontrol etmelidir. Referans makineye bağlı olan bara SL bus olarak ayarlanır.



Şekil 6.4. Referans makine ayar ekranı

PowerFactory'deki en yaygın Generatör/kaynak modelleri, senkron makine “ElmSym”, çift beslemeli endüksiyon makinesi “ElmAsmsc”, statik Generatör “ElmGenstat”, harici şebeke “ElmXnet”, AA gerilim kaynağı “ElmVac” ve AC akım kaynağı “ElmIac” şeklindedir. Uygun kaynak modeli seçilerek, parametre değerleri Şekil 6.5’teki gibi tanımlanmaktadır. Oluşturulan modelde algoritma içinde senkron makine “ElmSym” adıyla çağırılacaktır.



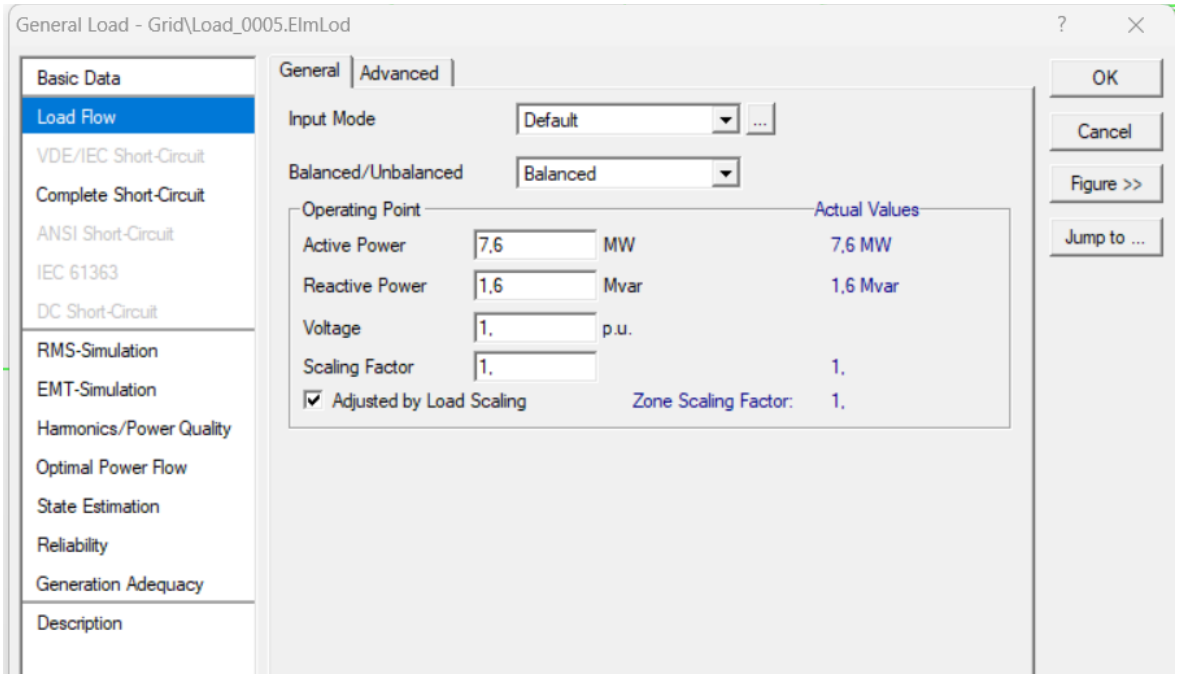
Şekil 6.5. Generatör/Kaynak parametrelerinin girilmesi

Generatöre bağlı bara PV moduna ayarlanmışsa, o baranın gerilimini sadece bir Generatör kontrol edebilir; Öte yandan voltaj kontrol şeması sarkma kontrolü olarak ayarlanırsa, birden fazla Generatör baranın voltajını kontrol edebilir. Aktif sevk ve gerilim set noktası giriş moduna göre tanımlanmalıdır. Ayrıca yükleme ve çalışma limiti ihlalini araştırmak için aktif ve reaktif güç maksimum ve minimum limitlerinin ayarlanması gerekmektedir.

PowerFactory'de, Generatörün reaktif ve aktif gücünü kontrol etmek için harici istasyon kontrolörü ve güç-frekans kontrolörü uygulamak da mümkündür. İstasyon kontrol sistemi,

Generatörlerin reaktif gücünün süpervizör kontrol sistemi olarak davranışını simüle etmek için kullanılır. Benzer şekilde, güç frekansı kontrolörü, bir veya daha fazla Generatörün aktif güç akışını kontrol ederek bir baradaki frekansı kontrol eder.

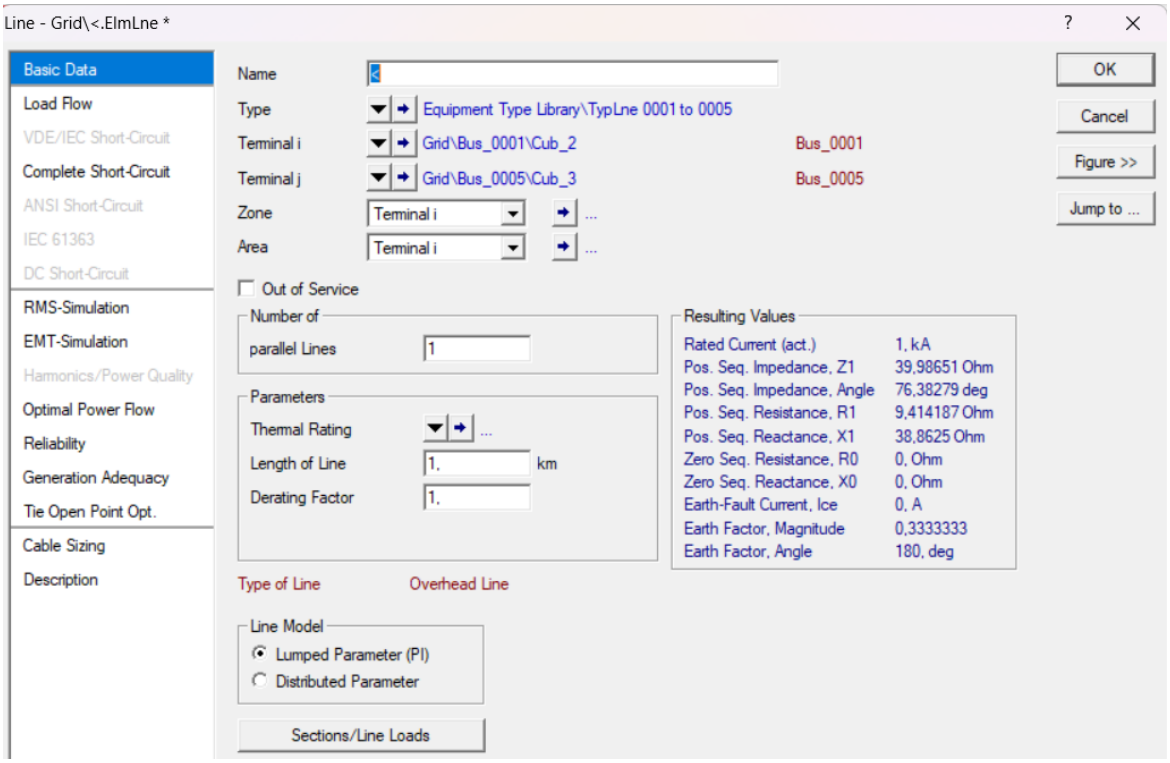
Yük : Bu elektrik şebekesi bileşenleri, aktif ve reaktif güç programı sağlar ve buna bağlı bara PQ bus olarak bilinir. Genel olarak, bir yük PowerFactory'de “ElmLod” sınıfı kullanılarak modellenir, ancak ek olarak, OG yükü “ElmLodmv” ve AG yükü “ElmLodlv” gibi şebeke voltajı seviyesine bağlı olarak başka modeller de mevcuttur. Şönt filtre “ElmShnt” rezistif (R), endüktif (L) ve kapasitif (C) filtre olarak ya da bunların kombinasyonu şeklinde modellenebilir. PowerFacotry'de motor gösterimi için asenkron makine “ElmAsm” modeli kullanılır. Motor, tek veya çift kafesli motor olarak modellenebilir. Yük parametre değerleri Şekil 6.6’daki gibi tanımlanmaktadır. Oluşturulan modelde algoritma içinde yük “ElmLod” adıyla çağırılacaktır.



Şekil 6.6. Yük parametrelerinin girilmesi

Seri Dallar : Seri dallar, ağı oluşturmak üzere iki terminali birbirine bağlayan elektrik bileşenleridir. Hatlar “ElmLne”, trafolar “ElmTr*”, seri reaktans “ElmSind”, seri kapasitans “ElmScap” ve filtreler “ElmSfilt” ve güç kontrol cihazlarını içerir. Her biri, ağın ayrıntılı modellemesi için alt kategorilere sahiptir. Hat parametre değerleri Şekil 6.7’deki gibi

tanımlanmaktadır. Oluşturulan modelde algoritma içinde yük "ElmLne" adıyla çağırılacaktır.



Şekil 6.7. Hat parametrelerinin girilmesi

6.2. Kararlılık Unsurlarına Göre Optimizasyon Algoritmasının Geliştirilmesi

Güç sistemlerinde kararlılık unsurlarına yönelik optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesi, elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği dikkat edilmesi gereken bir diğer husustur. Bu algoritmalar, güç sistemlerinin kararlılık analizlerini iyileştirmek, farklı operasyonel şartlar altında sistemin kararlılığını sağlamak, kararlılığı artırmak veya kararlılığı sürdürebilmek için kullanılabilir.

Öncelikle kararlılık problemlerini belirlemek gerekmektedir. Dinamik yapılarda bu kararlılık problemleri sistemin kendine özgü olmaktadır. Örneğin, büyük ölçekli bir güç sistemini ele alacak olursak ve bu sistemdeki gerilim kararlılığını artırmak istiyorsak kararlılıkla ilgili hedeflerimizi ve kısıtlamalarınızı net bir şekilde tanımlamak gerekmektedir. Bu kısıtlamalar ve tanımlarda genellikle büyük verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler sistem topolojisi, yük tipleri, üretim kapasiteleri, hat taşıma kapasiteleri ve bara gerilimleri gibi bilgileri içermektedir. Dinamik yapılarda bu veriler

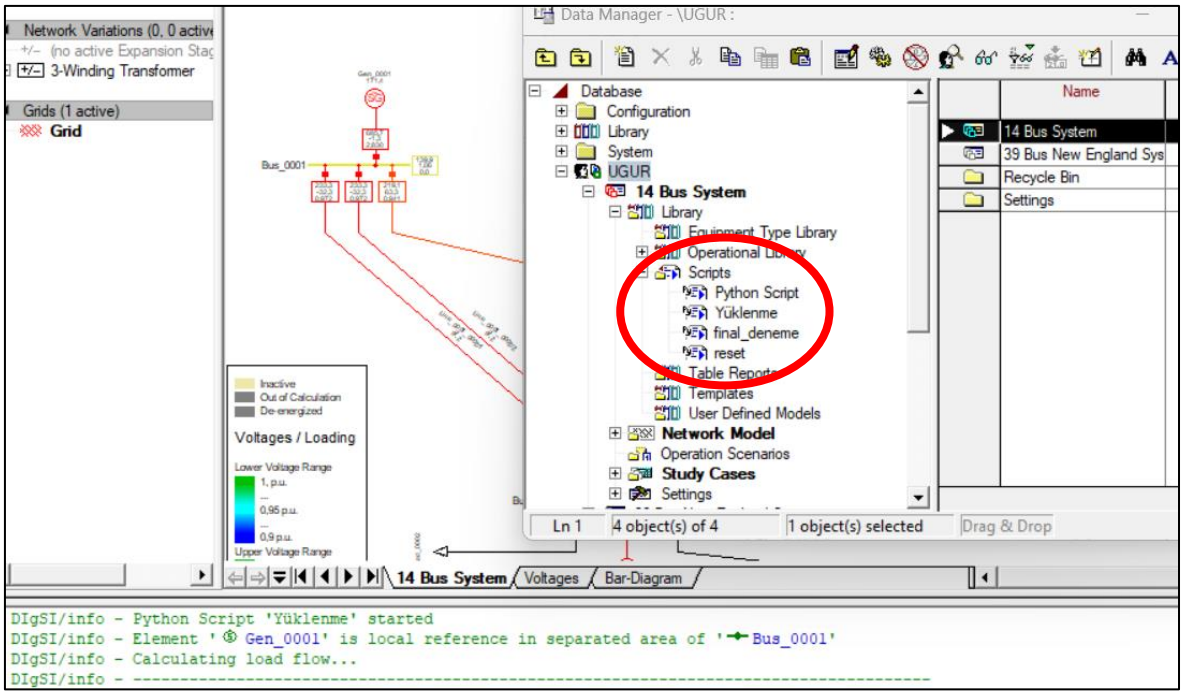
sürekli değişken olabilmektedir ve bu bilgileri sürekli toplamak ve analiz etmek algoritmanın temelini oluşturmaktadır.

6.2.1. Güç sisteminde gerilim kararsızlığına yol açan etkenlerin belirlenmesi

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin yük ihtiyacı ile kaynaklardan üretilen ve yük merkezlerine iletim hatları vasıtasıyla iletilen güç arasındaki dengelerin korunmasıdır. Sistemdeki yük artışlarından dolayı oluşan gerilim düşüşünden sonra, toparlanma sürecinde, bu ve başka etkilerden meydana gelen güç tüketimini ve üretimini telafi etmek gerekmektir. Kararlı yüklerin ve iletim, dağıtım şebekesi ile üretim kaynaklarının kapasitesinin artmasına bağlı olarak gerilim kararsızlıkları meydana gelebilmektedir. Bir güç sistemde yük profillerinin değişmesi veya yük artışı gerilim kararsızlığına direkt olarak etki etmektedir. Bu etki ile birlikte üretilebilecek güç kapasitesi, iletim hatlarının kapasitesi ve bara gerilimleri de değişkenlik göstermektedir. Bu durumda güç siteminde bulunan yük baralarının yüklenme kapasiteleri, gerilim düşüşü sınırları, generatör kapasiteleri, iletim hatlarındaki güç akışı sınırları gibi kararlılık kısıtlamalarını belirlemekte yardımcı olabilmektedir.

6.2.2. Yüklenebilirlik kapasitelerinin belirlenmesi

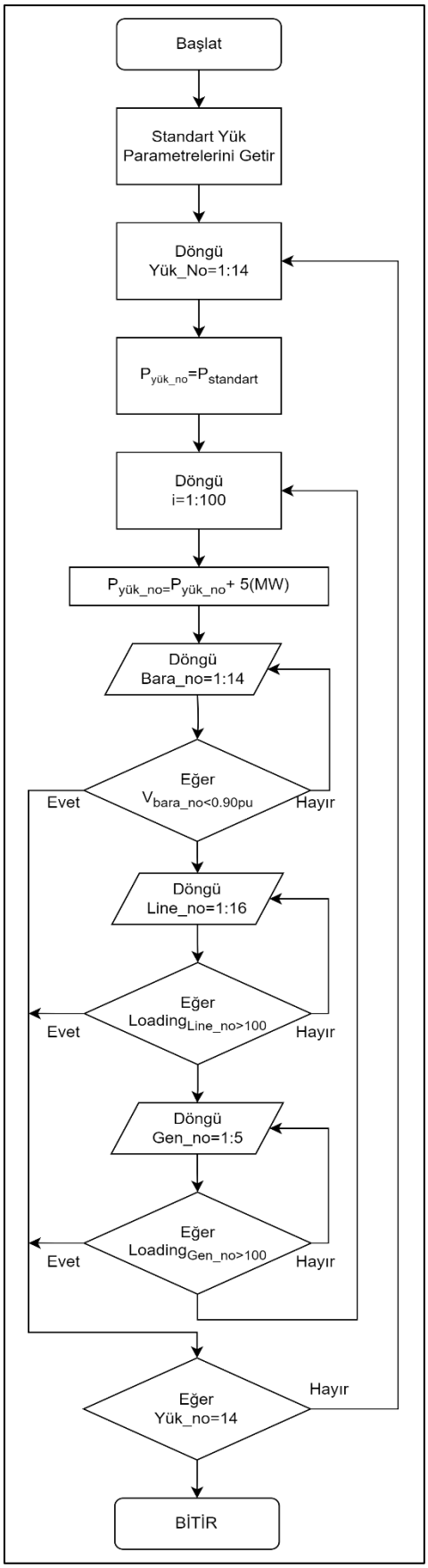
Şekil 6.2'de yer alan IEEE 14 bara sistemi DIgSILENT PowerFactory benzetim programında Çizelge 3.2-3.5'te verilen parametrelerle oluşturulmuştur. Sistemde tanımlı yük, generatör, bara parametreleri Python programlama dilinde yazılmış bir script ile alınmıştır. Burada oluşturulan kod ile farklı baralara bağlı yüklerin maksimum kapasitelerini belirlemek için bu yük değerleri ayrı ayrı artırılarak sistem analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8'de benzetim programı ve içerisinde Python kodunun tanımlanması görülmektedir.



Şekil 6.8. DIgSILENT PowerFactory ve Scriptlerin tanımlanması

Script her yük için yükler ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları doğrultusunda her yük artışına karşılık hat, bara ve generatörlerdeki yüklenme oranları incelenmiştir. Dolayısıyla, her yük artışının sistem kararlılığına etkisi elde edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, baralara bağlanacak yükün maksimum değeri sistem kararlılığı göz önünde bulundurularak tespit edilmiştir. Maksimum yüklenme kapasitelerinin belirlenmesine ait Scripte ait akış şeması Şekil 6.9'da verilmiştir.

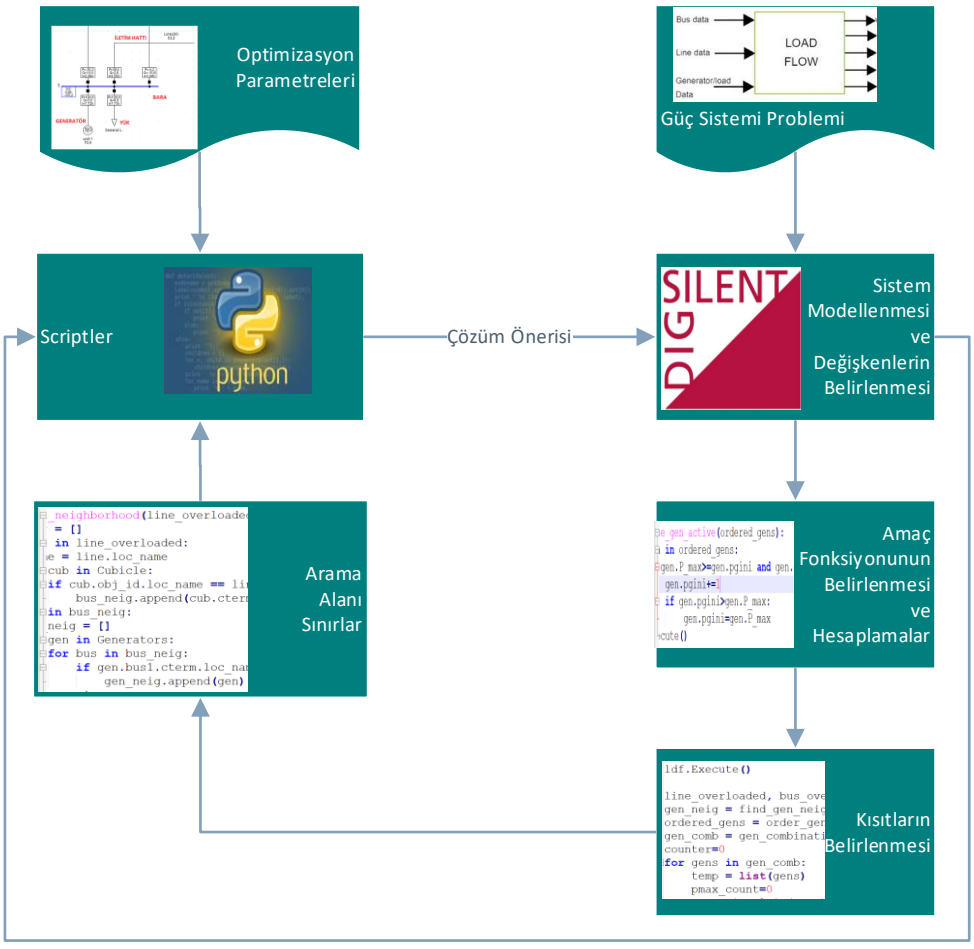
Burada hatların maksimum yüklenme değeri %100, bara gerilim eşik değerleri 0.90-1.10 pu, maksimum generatör yüklenme oranı ise %100 olacak şekilde sistem kararlığı sınırları belirlenmiştir.



Şekil 6.9. Maksimum yüklenme Scripti akış şeması

6.3. Benzetim Modeli ile Optimizasyon Algoritmasının Tümleşik Çalıştırılması

Optimizasyon parametrelerinin ayarlanması ve en iyiyi bulmak için sistem cevaplarının kullanılması gereksinimleri, optimizasyon ve benzetim modellerinin eşzamanlı çalıştırılmasını gerektirmektedir. Bu iki yaklaşımın tümleşik çalıştırılması, dinamik sitem analizlerinde sonuçları geniş açıdan görmemize ve daha iyi sonuçlar elde etmemize olanak sağlamaktadırlar. Benzetim programı ve optimizasyon algoritmasının tümleşik çalışma modeli Şekil 6.10'da görülmektedir.

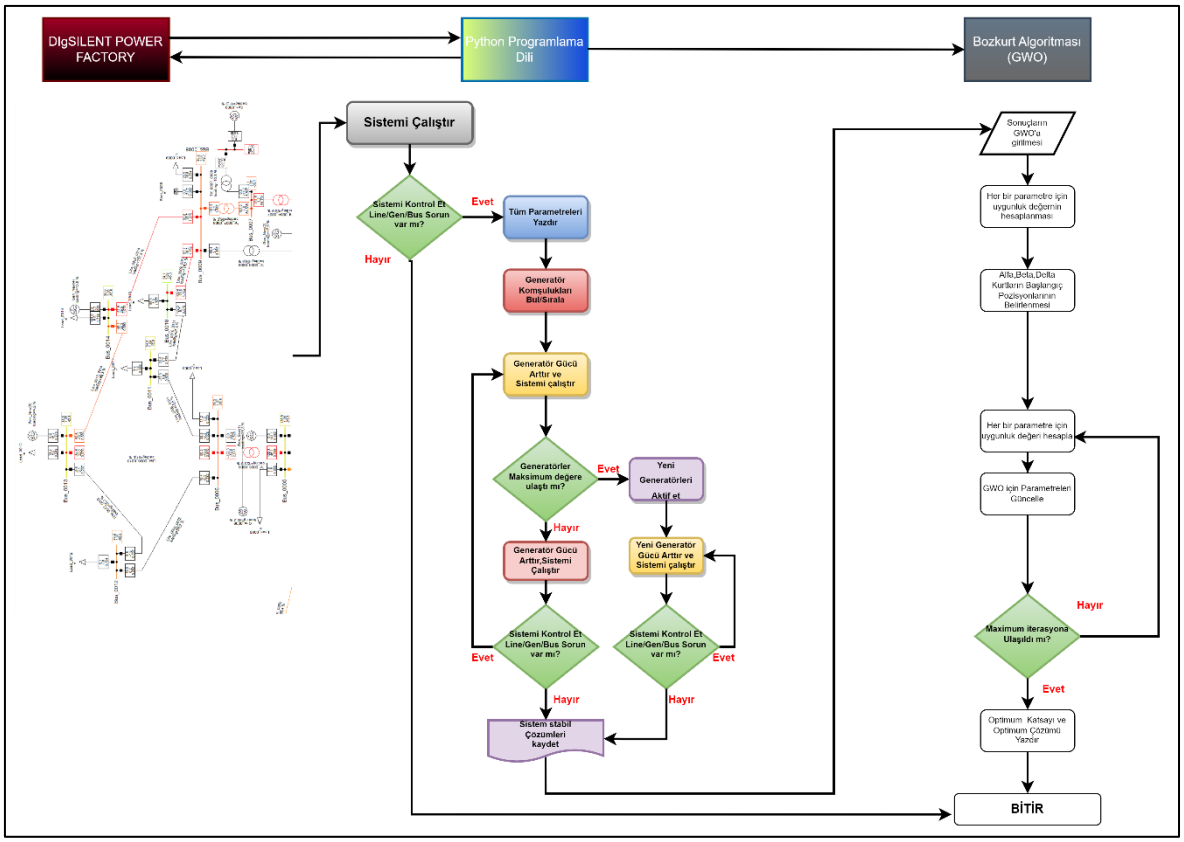


Şekil 6.10. Tümleşik çalışma modeli

Öncelikle, Bozkurt Optimizasyon Algoritması Python dilinde hazırlanmıştır. Bu algoritma, DIgSILENT PowerFactory ile etkileşimde bulunacak ve güç sistemlerinin performansını optimize etmek için kullanılmaktadır. Python'da hazırlanan algoritmanın PowerFactory ile iletişim kurabilmesi için DIgSILENT PowerFactory COM (Component Object Model) arabirimini kullanmaktadır. Bu iletişim, Python'un PowerFactory'deki benzetim modeli,

verileri ve sonuçları okumasını ve yazmasını içermektedir. Bu iletişim, Python'un PowerFactory'deki modelleri, verileri ve sonuçları okumasını ve yazmasını içerir. Tümleşik çalışmada iletişim sağlandıktan sonra güç sistemindeki veriler optimizasyon algoritmasında işlenerek, yük akışı, güç akışı, gerilim düşüşler, hat yüklenmeleri gibi parametreler sürekli olarak analiz edilerek sistemin kararlılık kriterleri kapsamında optimum koşulları izlemenize ve sonuçları PowerFactory üzerinde görselleştirmenize olanak tanır.

Güç sistemlerinde çözüm önerilerinin sayısının fazla olması ve çeşitliliği tercih edilecek çözümün optimum seçimini gerektirmektedir. Bu doğrultuda DIgSILENT ve Python tümleşik çalışmasına ilave olarak Bozkurt Optimizasyon Algoritması ile farklı çözüm seçenekleri arasından optimum olanı seçilmiştir. Oluşturulan BOA, Şekil 6.19'da Scriptler bölümüne yerleştirilerek modelin optimizasyon algoritması ile bütünleşik çalıştırılması sağlanmıştır. Bu bütünleşik çalışma durumuna ait akış şeması Şekil 6.11'de görülmektedir.



Şekil 6.11. Kaynak boyutu ve optimum yer tayini optimizasyon akış şeması

Akış şemasından görüldüğü üzere, gerilim kararlılığı sorunlarının giderilmesi için işlem basamakları; (1) DIgSILENT Power Factory benzetim programında oluşturulan sistem

modeli belirtilen kısıtlarla çalıştırılmaktadır. (2) Sistem Python pogramlama dilinde oluşturulmuş Scriptlerle farklı iterasyonlarla yük akışı hesabı yaptırılmaktadır. Bu çalışma esnasında sistem parametrelerinden hat yüklenmeleri, bara gerilim düşümleri, generatör yüklenmeleri sürekli kontrol edilmekte ve kararlılık durumu incelenmektedir. (3) Mevcut kaynaklar ile sistem 1 MW gücünde artışlar ile denendikten sonra çözüm bulunamaması durumunda yeni generatörler ile benzetimler tekrar yapılmakta ve tüm parametreler aynı anda kayıt altına alınmaktadır. (4) Elde edilen çok sayıda farklı çözüm önerileri BOA'da analiz edilmektedir. Optimizasyon algoritması önerilen çözümlerden, hat yüklenmeleri, bara gerilimleri, generatör yüklenmeleri, hat mesafeleri ve kayıpları göz önünde bulundurarak en uygun çözümleri tespit etmektedir. Bu çözümler içerisinde optimum çözüm aranırken sistemde kararlılık kısıtları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Optimizasyon Çözüm Parametreleri

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır
Bara Gerilimi	0,89 pu	1,10 pu
Hat Yüklenmesi	-	%90 Yüklenme
Generatör Minimum Değeri	Toplam Generatör (MW) > Toplam Yük (MW)	-
Generatör Yüklenmesi	-	%90 Yüklenme

Oluşturulan güç sistemi modelinde yük artışına bağlı meydana gelen kararlılık probleminin çözümünde Çizelge 6.2'de verilen bara gerilimi, hat yüklenmeleri, generatör yüklenmeleri kısıtları ile sonuçlar değerlendirilmiştir.

7. BENZETİM SONUÇLARI

Benzetim çalışmaları, DIgSILENT PowerFactory'de oluşturulan 14 Bara Test sistemi üzerinde farklı durum ve senaryolar ile gerçekleştirilmiştir. IEEE 14 bara sisteminde bulunan bileşenlerin standart değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Çizelgede verilen parametrelerden görüldüğü üzere, normal çalışma esnasında tanımlı 5 generatör bulunmaktadır. Çözüm önerileri esnasında ihtiyaç duyulacak yeni kaynaklar Bara 5'e Gen_New (1), Bara 4'e Gen_New (2), Bara 13'e Gen_New (3), Bara 14'e Gen_New (4), ile tanımlanmıştır. Bu kaynaklar normal çalışma esnasında aktif değildirler. Çözüm arayışında ihtiyaç duyulması halinde sıra ile aktif edilmekte ve gücü artırılmaktadır. Böylece mevcut kaynaklarla çözüm bulunamaması durumunda yeni kaynaklar devreye alınarak problem çözümü gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte Çizelge 7.1'de görüldüğü üzere IEEE 14 bara sisteminin standart değerleri hem hat yüklenme oranı hem de generatör üretim kapasiteleri açısından alt sınır değerlere oldukça yakın seviyelerdedir. Bu durum bara sisteminin normalde üretim-tüketim kapasitesinin altında çalıştığının bir göstergesidir. Bu nedenle hem hat yüklenme oranları hem de generatör üretim kapasiteleri açısından sınır değerlerinin üzerine çıkabilmek için yük ve üretim tarafında yüksek seviyelerde artışlar yapmak gerekmektedir.

Çizelge 7.1. IEEE 14 Bara Normal Çalışma Değerleri

Bilesen Adı	Yüklenme (%)	Bilesen Adı	Gerilim (pu)	Bilesen Adı	Güç (MW)	Bilesen Adı	Güç (MW)
Line_0010_0011	6.78	Bus_0001	1.06	Load_0002	21.70	Gen_0001	232.40
Line_0012_0013	2.94	Bus_0002	1.04	Load_0003	94.20	Gen_0002	40.00
Line_0013_0014	9.79	Bus_0003	1.01	Load_0004	47.80	Gen_0003	0.00
Line_0001_0002/1	32.63	Bus_0004	1.02	Load_0005	7.60	Gen_0006	0.00
Line_0001_0005	31.22	Bus_0005	1.02	Load_0006	11.20	Gen_0008	0.00
Line_0002_0003	30.70	Bus_0006	1.07	Load_0009	29.50	Gen_New(1)	-
Line_0002_0004	23.52	Bus_0007	1.06	Load_0010	9.00	Gen_New(2)	-
Line_0002_0005	17.42	Bus_0008	1.09	Load_0011	3.50	Gen_New(3)	-
Line_0003_0004	10.44	Bus_0009	1.06	Load_0012	6.10	Gen_New(4)	-
Line_0004_0005	27.27	Bus_0010	1.05	Load_0013	13.50		
Line_0006_0011	13.28	Bus_0011	1.06	Load_0014	14.90		
Line_0006_0012	13.36	Bus_0012	1.06				
Line_0006_0013	31.29	Bus_0013	1.05				
Line_0009_0010	11.23	Bus_0014	1.04				
Line_0009_0014	16.77						
Line_0001_0002/2	32.63						

Oluşturulan Python Scriptleri tek bir noktada, iki farklı noktada, 3 farklı noktada ve 6 farklı noktada yük artışı olması senaryoları altında çalıştırılmıştır. Güç sisteminde meydana gelen hat yüklenme problemleri, bara gerilim problemleri için çözüm önerileri tespit edilmiştir. Daha sonra bu senaryolarda elde edilen çözüm önerileri içerisinden optimum olanı bulabilmek için oluşturulan Bozkurt Optimizasyon Algoritması ile en iyi beş çözüm önerisi listelenmiştir. Bu çözüm önerileri benzetim programında uygulanarak doğrulama yapılmıştır.

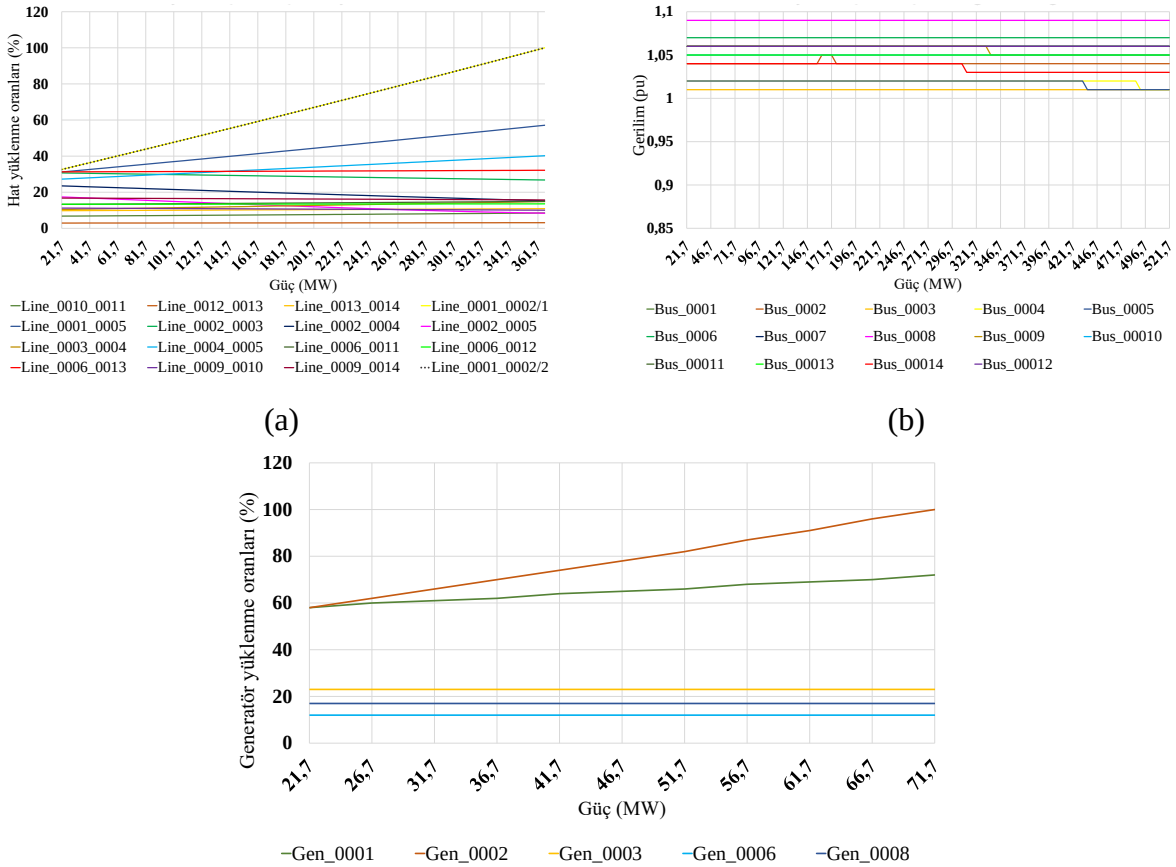
7.1. Maksimum Yüklenebilirlik Kapasitelerinin Belirlenmesi

IEEE 14 test bara sisteminin normal çalışma parametreler Çizelge 3.2-3.5'te verilmiştir. Sistemde tanımlı yük, generatör, bara parametreleri Python programlama dilinde yazılmış bir Script ile alınmıştır. Burada oluşturulan kod bloğu ile DIgSILENT benzetim programı tümleşik olarak çalıştırılmıştır. Bu tümleşik çalışmada farklı baralara bağlı yüklerin maksimum kapasitelerini belirlemek için güç değerleri ayrı ayrı artırılarak sistem yük akış analizleri sürekli olarak tekrarlanmakta ve sonuçlar alınmaktadır.

Python ve güç sisteminin modellendiği benzetim programıyla elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

IEEE 14 bara sisteminde 2 numaralı bara (Bus_0002)'ya bağlı Yük 2 (Load_0002) kademeli olarak değerinin artırılmasıyla sistem parametrelerindeki değişim sürekli olarak izlenmektedir. Bu dinamik yapıda yük artışının, hat yüklenme oranları, generatör yüklenme oranları ve bara gerilimleri üzerindeki etkileri Şekil 7.1'de gösterilmektedir.

Yük 2'deki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.1 (a)'da görülen sonuçlara göre yük artışı, bara gerilimleri üzerinde çok az etki yapmıştır. Yük 3 değeri, 94.2 MW'tan başlayarak 5 MW'lık artırımlarla yükseltilmiş., bara yük değeri 354.2 MW'a yükseldiğinde Bara 2 ve Bara 3 arasındaki iletim hattı olan Line_0002-0003 hat yüklenme oranı sınır değerin (%100) üzerine çıkmıştır.



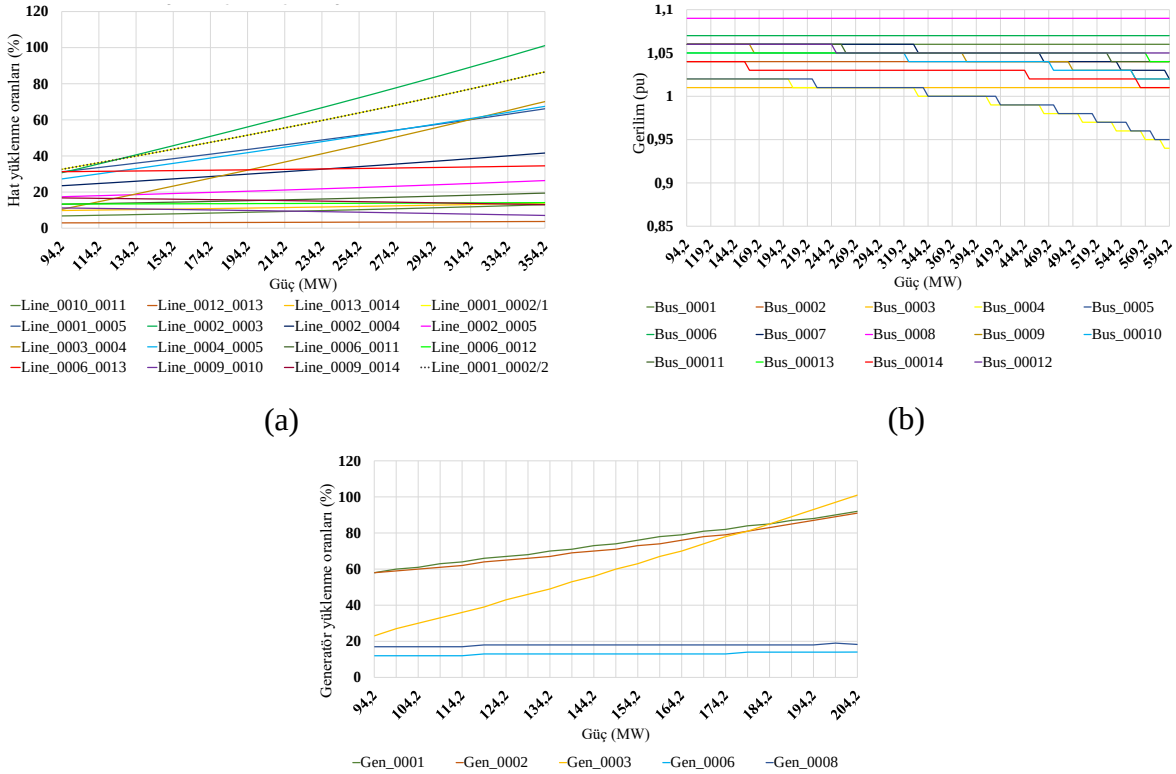
Şekil 7.1. Yük 2'nin alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 2'deki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Şekil 7.1 (b)'de verilen grafikte Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, yük artışına bağlı olarak değişimin bara gerilimlerine çok az etki ettiği görülmektedir. Burada yükün değeri 520 MW'a kadar çıkarılmasına karşın bir düşüş gözlemlenmemiştir. Bu da bara gerilimi göz önüne alındığında sistemin kararlılığı için üst limitin yüksek olduğu anlamına gelmektedir

Yük 2'deki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.1 (c)'de gösterilen kademeli yük artışına bağlı olarak generatör yüklenme oranları incelendiğinde ise Generatör 2'nin yüklenme oranı, Yük 2'nin değeri 71.7MW'a ulaştığında maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu sonuç generatörlerin yüksek yük altında çalışmasının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Sistem çalışma limitlerini belirlerken, bara, hat ve generatör parametrelerinin birlikte dikkate alınması önemlidir. Bu, sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini sağlamak için gereklidir. Yük 2'nin maksimum değeri, generatörlerin belirli sınırları aşmamasını sağlamak için dikkatlice seçilmelidir. Bu şekilde, sistemin sorunsuz çalışması ve generatörlerin aşırı yüklenmesinin önlenmesi sağlanabilir. Bu grafikler göz önüne alındığında sistem çalışma limitleri belirlenirken bara, hat ve generatör parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Yük 2'nin maksimum değeri, generatör yüklenme oranlarının belirli sınırları aşmaması için 71.7MW'tan küçük seçilmelidir. Bu şekilde, sistemin sorunsuz çalışması ve generatörlerin aşırı yüklenmesinin önlenmesi sağlanır.

IEEE 14 bara sisteminde Bara 3' e bağlı Yük 3 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.2'de görülmektedir.



Şekil 7.2. Yük 3'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 3’teki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 3 değeri, 94.2 MW’tan başlayarak 5 MW'lık artırımlarla yükseltilmiş. Şekil 7.2 (a)'da görülen sonuçlara göre, bara yük değeri 354.2 MW'a yükseldiğinde Bara 2 ve Bara 3 arasındaki iletim hattı olan Line_0002-0003 hat yüklenme oranı sınır değerin (%100) üzerine çıkmış. Bu, iletim hattının aşırı yüklendiğini gösterir.

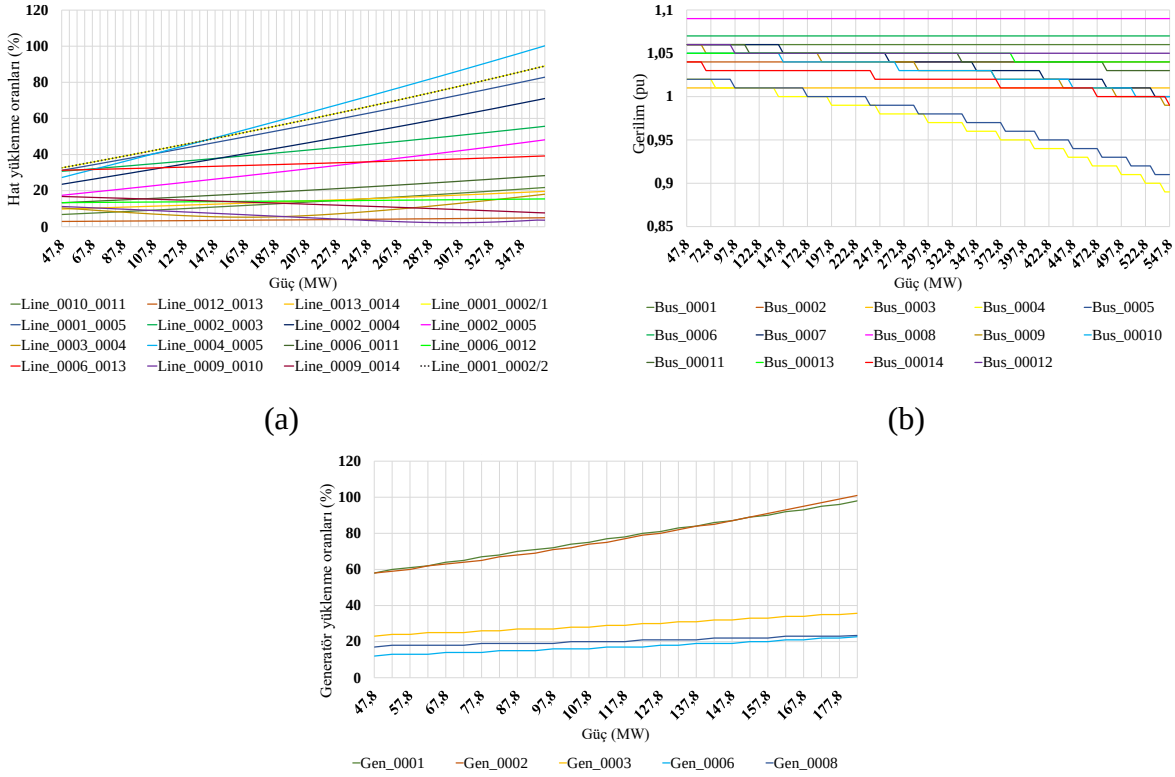
Yük 3’teki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi de incelenmiş. Şekil 7.2 (b)'ye göre, Yük 2 değeri 594.2 MW olduğunda Bara 4 gerilim değeri eşik değerin altına düşmüş. Bu, bara geriliminin belirli bir sınıra yaklaştığını göstermektedir.

Yük 3’teki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.2 (c) incelendiğinde kademeli artışlarla birlikte Yük 3 değeri 204.2 MW'a ulaştığında Generatör 3'ün yüklenme oranı maksimum seviyeye çıkmış. Bu artışla birlikte generatörün yük altında çalışma sınırlarına yaklaştığını göstermektedir.

Grafikler birlikte incelendiğinde IEEE 14 bara sisteminde Yük 3 değerinin artışında ilk olarak Generatör yüklenme değerinin maksimum 204 MW altında bir değerde çalıştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu değer sistemin kararlı çalışması için hatların, bara gerilimlerinin ve generatörlerin sınırlarının aşılmaması için önemlidir.

Bara 4'e bağlı olan 47.8 MW olan Yük 4’ün değerindeki kademli artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.3’te gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde;

Yük 4’teki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 4 değeri, 47.8 MW’tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve Şekil 7.3 (a)'dan görüldüğü üzere, özellikle Yük 4’ün de bağlı bulunduğu Bara 4'e bağlı hatlardaki yüklenme oranları sınır değerlerin üzerinde artmıştır. Buna göre 362.8 MW yük değerine ulaşıldığında, Bara 4 ve Bara 5 arasındaki iletim hattı Line_0004_0005 hattında yüklenme oranı %100,21'e çıkmıştır.



(a) (b)

(c)

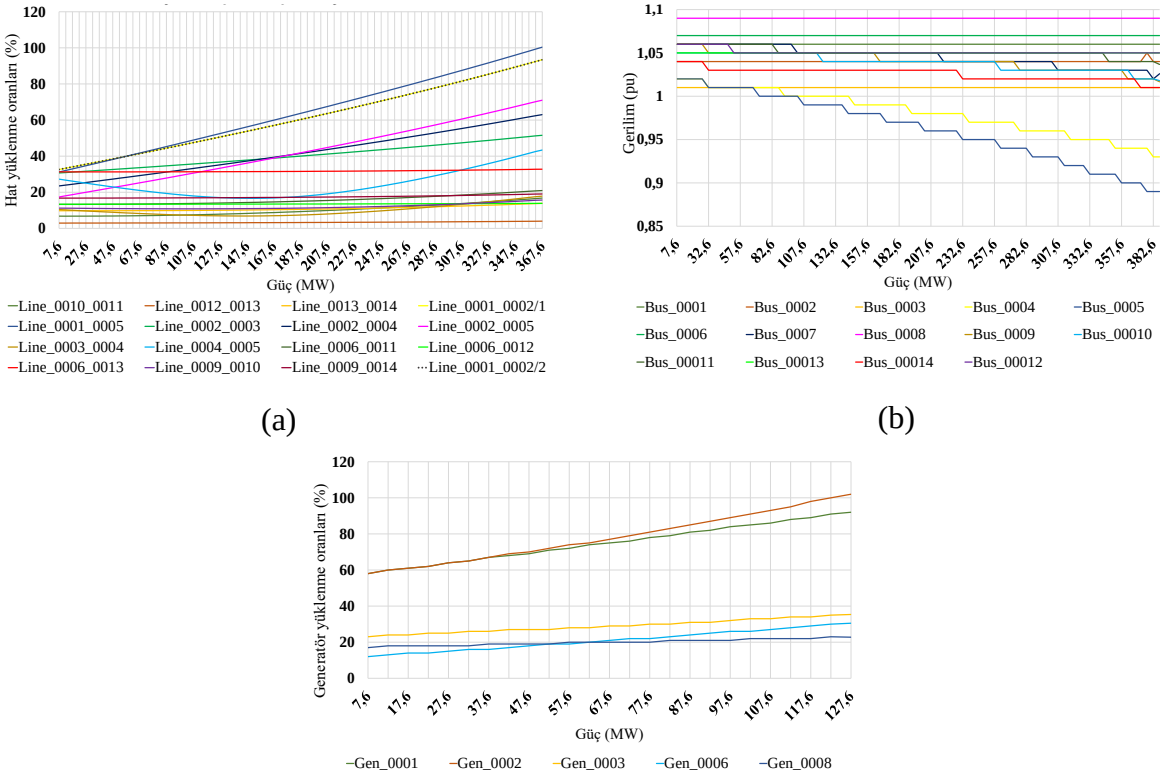
Şekil 7.3. Yük 4'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 4'teki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7.3 (b)'den görüldüğü üzere, 547.8 MW değerinde Bara 4'ün gerilim değeri 0.89 pu'a düşmüştür. Bu, bara geriliminin belirli bir sınıra yaklaştığını göstermektedir.

Yük 4'teki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.3 (c)'de verilen grafikte generatör yüklenme oranlarına bakıldığında ise Yük 4'ün değeri 182.9 MW seviyesine ulaştığında 2 numaralı baraya (Bus_0002) bağlı Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %101 olmaktadır.

Bu değerler karşılaştırıldığında Bara 4'e bağlı olan Yük 4'ün maksimum yük değerinin 182 MW'a kadar olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu, sistemin kararlı çalışması ve hatların, bara gerilimlerinin ve generatörlerin sınırlarının aşılmaması için önemlidir. Bu durumda, generatör yüklenme oranının sınırları aşılmadan Bara 4'e eklenebilecek maksimum yük miktarı 182 MW olarak belirlenmiştir.

Bara 5'e bağlı Yük 5 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Buna göre;



Şekil 7.4. Yük 5'in alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

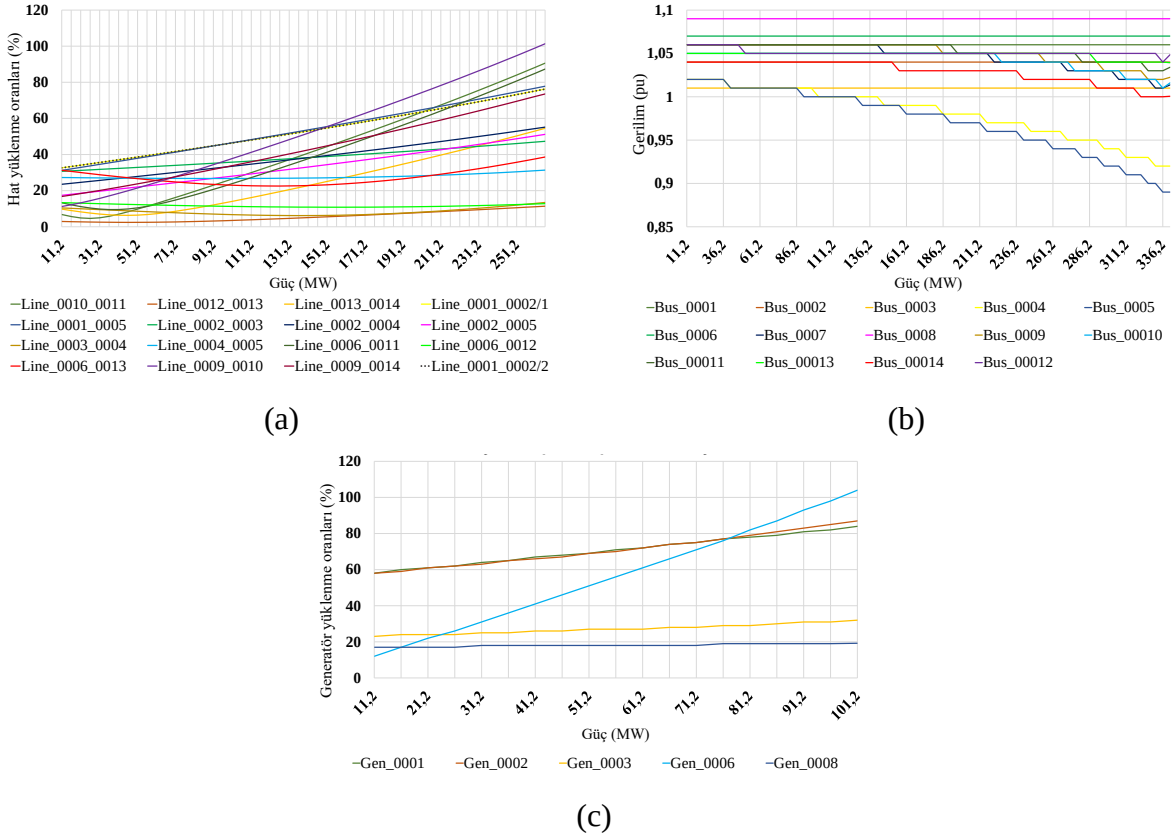
Yük 5'teki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: IEEE 14 bara sisteminde Yük 5 değeri 7.6 MW olarak belirlenmiştir. Bu değerden başlayarak kademeli olarak yük artışı yapılmış ve Şekil 7.4 (a)'dan görüldüğü üzere, 367.6 MW yük değerine ulaşıldığında Line_0001_0005 hattında yüklenme oranı %100.4 olmuştur. İletim hattının yüklenme sınırı aştığı değer 367.6 MW olarak belirlenmiştir.

Yük 5'teki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Şekil 7.4 (b)'de verilen Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş grafikte görüldüğü üzere, 387.6 MW değerinde Yük 5'in Bara 5'in gerilim değerini 0.89 pu'a kadar düşürdüğü görülmüştür. Bu, bara geriliminin belirli bir sınıra yaklaştığını göstermektedir.

Yük 5’teki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.4 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında, Yük 5'in değeri 127.6 MW'a ulaştığında Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %102 olmuştur.

Bara 5'e bağlı Yük 5 değerinin, generatör yüklenmesindeki değeri referans alındığında maksimum 127 MW olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu, sistemin kararlı çalışması ve iletim hattının, bara gerilimlerinin, generatörlerin sınırlarının aşılmaması üst sınır olarak belirlenmiştir.

IEEE 14 bara sisteminde Bara 6'ya bağlı Yük 6 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.5’te incelenmiştir.



Şekil 7.5. Yük 6’nın alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 6’daki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 6 değeri, 11.2 MW’tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve Şekil 7.5 (a)'dan görüldüğü üzere, 266.2 MW yük değerine ulaşıldığında Bara 9 ve Bara 10 arasındaki ilerin hattı olan Line_0009_0010 hattında

yüklenme oranı %101.34 olmuştur. Hat yüklenmeleri açısından değerlendirildiğinde Yük 6'nın alabileceği maksimum değer 266 MW olmaktadır.

Yük 6'daki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7.5 (b)'de verilen grafik incelendiğinde Yük 6'nın 341.2 MW değere kadar artırıldığında, Bara 5'in gerilim değerini 0.89pu'a kadar düşürdüğü görülmüştür.

Yük 6'daki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.5 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında ise Yük 6'nın değeri 101.2 MW iken bu yükü beslemeye çalışacak olan Gen_0006 generatörünün yüklenme oranı %104'e yükselerek kararsızlık oluşturmuştur.

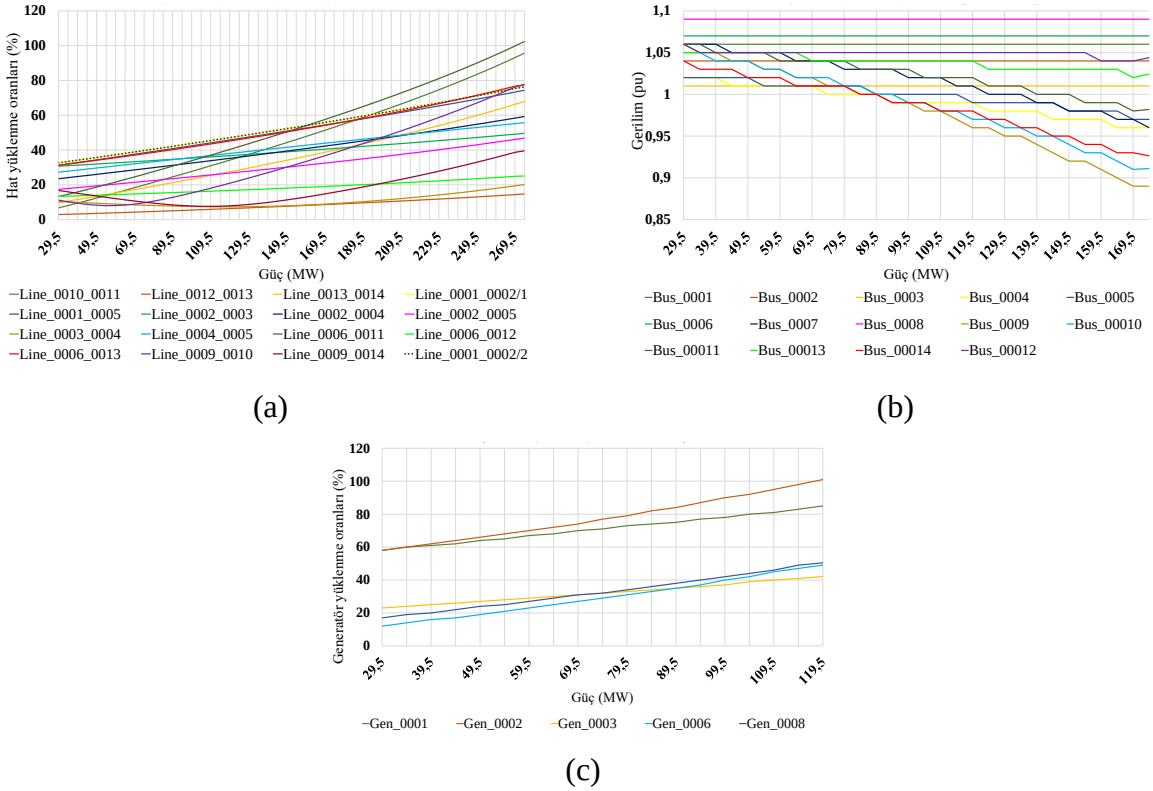
Bu üç grafikte sonuç olarak Bara 6'ya bağlı maksimum Yük 6 değerinin 100 MW olabileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle generatör yüklenme oranlarındaki sınırın aşılmaması, sistemin kararlı çalışması, iletim hattının ve bara gerilimlerinin sınırlarının aşılmaması 100MW üst sınıra kadar yük artışı önemlidir.

IEEE 14 bara sisteminde Bara 9'a bağlı Yük 9 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.6'da verilmiştir.

Yük 9'daki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 9 değeri, 29.5 MW'tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve Şekil 7.6 (a)'dan görüldüğü üzere, 274.5 MW yük değerine ulaşıldığında Line_0006_0011 hattında yüklenme oranı %102.35 olmuştur.

Yük 9'daki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7.6 (b)'de Yük 9'un değeri 174.5 MW değerine kadar artırıldığında, Yük 9'un bağlı bulunduğu Bara 9'un gerilim değeri 0.89 pu'a düşürdüğü görülmüştür.

Yük 9'daki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.6 (c)'deki generatör yüklenme oranları incelendiğinde ise Başlangıç değeri 29.5 MW olan Yük 9'un değeri 119.5 MW iken Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %101 seviyelerine kadar çıkmıştır.

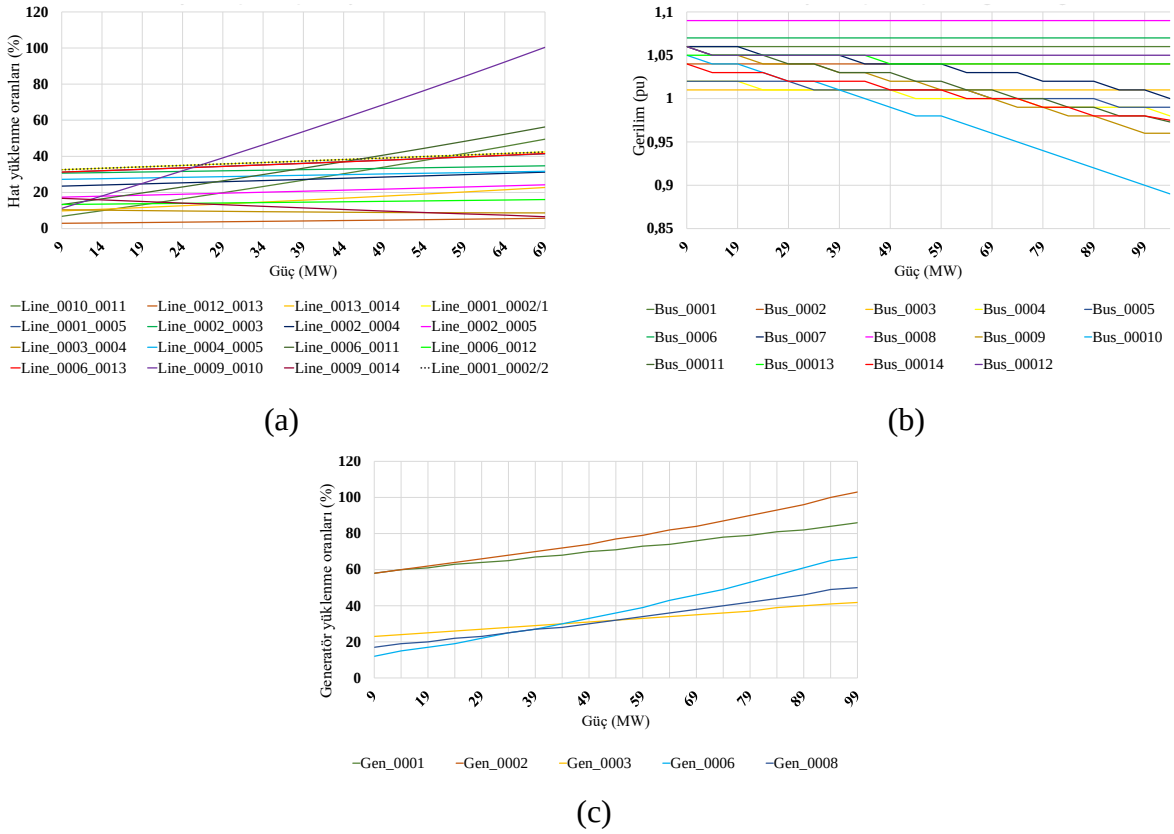


Şekil 7.6. Yük 9'un alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Sonuç olarak, bu üç durumun birlikte değerlendirilmesiyle Bara 9'a bağlı olan Yük 9'un maksimum değerinin 119 MW olabileceği sonucuna varılmıştır. Yine burada belirleyici unsur yük artışlarında sistem kararlılığını sağlayabilmek için generatörlerin yükü besleme ihtiyacından dolayı generatör yüklenme oranları olmuştur.

Bara 10'a bağlı Yük 10 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.7'de verilmiştir.

Yük 10'daki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.7 (a)'da hat yüklenme oranları grafiksel olarak gösterilmektedir. Burada Bara 10'a bağlı Yük 10 değeri, 9 MW'tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve 69 MW yük değerine ulaşıldığında Line_0009_0010 hattında yüklenme oranı %100.38 olmuştur.



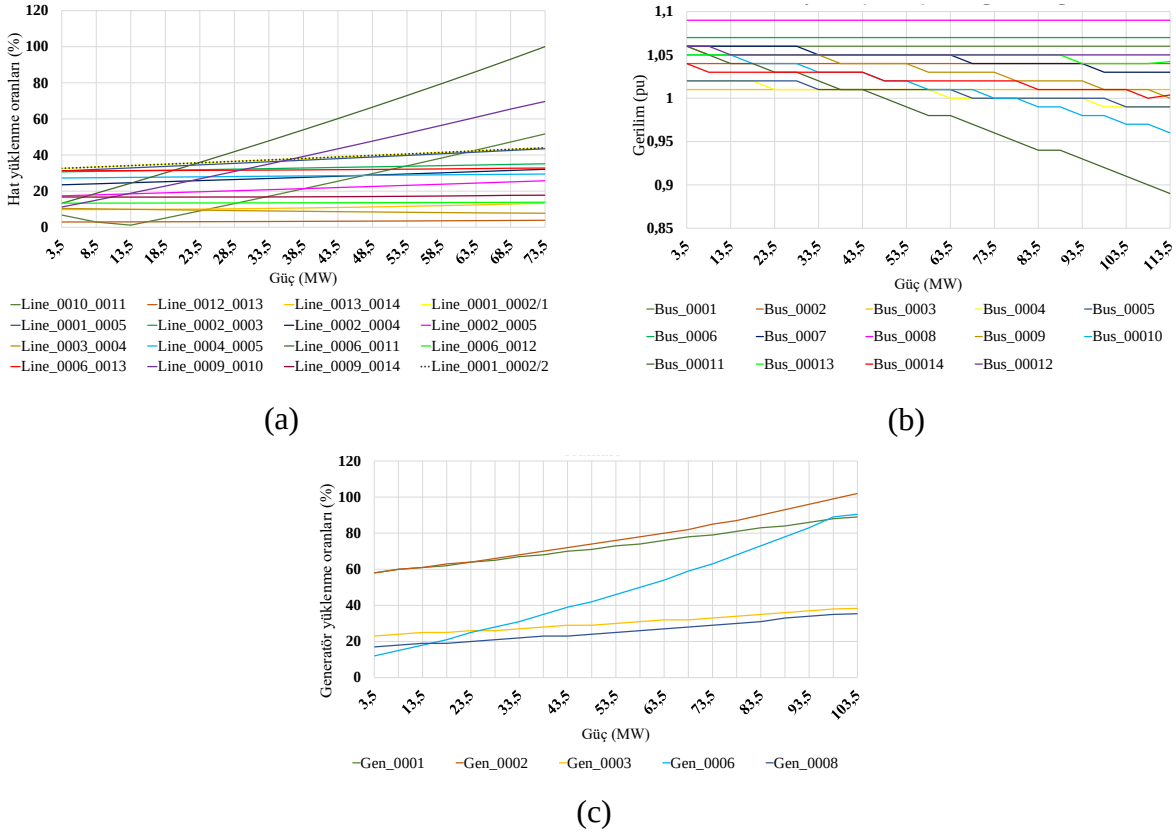
Şekil 7.7. Yük 10'un alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 10'daki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Şekil 7.7 (b)'de yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelendiğinde ilgili yükün değeri 104 MW değerine ulaştığında başlangıçta 1.05 pu olan Bara 10'un gerilim değerini 0.89pu'a kadar düşürdüğü görülmüştür.

Yük 10'daki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.7 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında, Yük 10'un değeri 99 MW iken Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %102 seviyelerinde olmuştur.

Hat yüklenmeleri, bara gerilimleri ve generatör yüklenmeleri birlikte incelendiğinde ise Bara 10'a bağlı maksimum Yük 10 değerinin hat yüklenme oranlarından dolayı 69 MW olabileceği sonucuna varılmıştır. Burada hat yüklenmesinin ilk olarak sınır değere ulaşmasının nedeni ise yükün bağlı bulunduğu barada herhangi bir üretim kaynağının olmaması ve diğer üretim kaynaklarına olan mesafesidir.

Bara 11'e bağlı Yük 11 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.8'de gösterilmiştir.



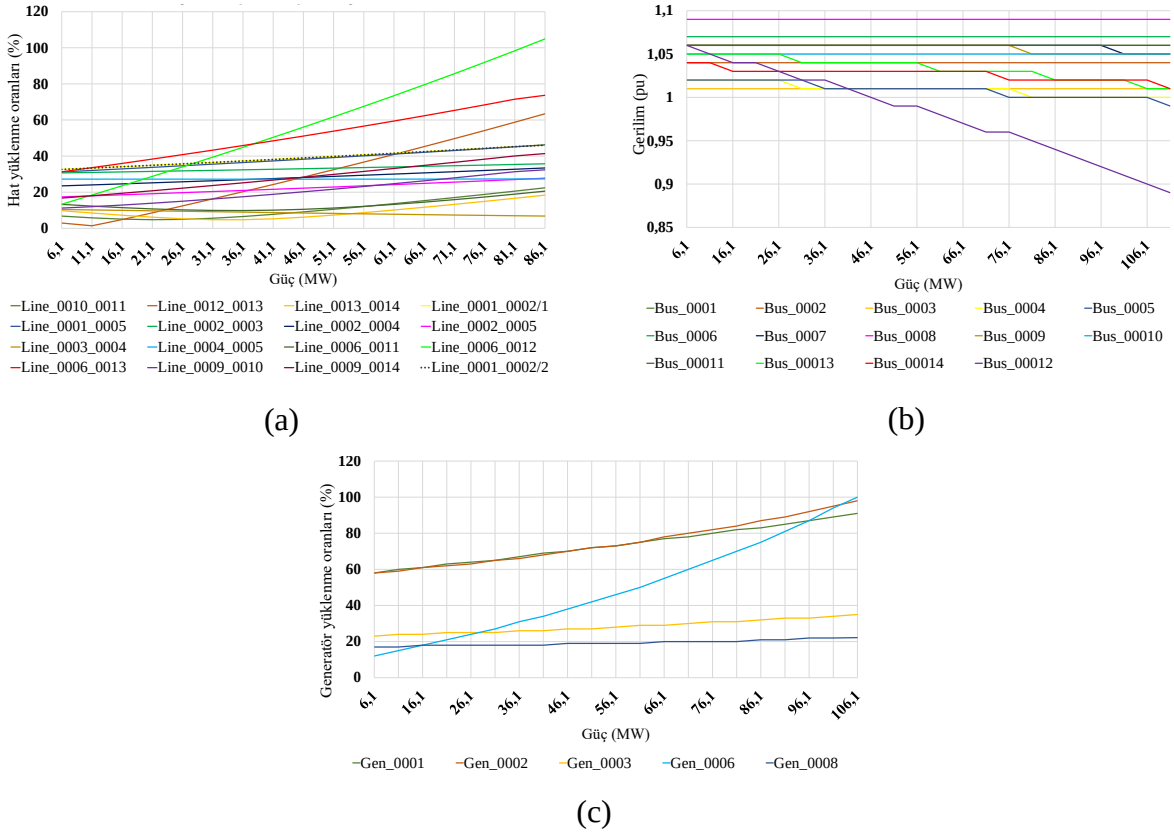
Şekil 7.8. Yük 11'in alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 11'deki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Başlangıçta değeri 9 MW olan Yük 11 değeri, kademeli olarak artırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7.8 (a)'dan gösterilmiştir. Yük 11'in değeri 73.5 MW'a kadar artırıldığında hatlardan bazılarında yüklenme sınırları aşılmıştır. Bara 6 ve Bara 11 arasındaki iletim hattı olan Line_0006_0011 hat yüklenme oranı %100.04'e kadar çıkarak maksimum limitleri aşmaktadır.

Yük 11'deki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7.8 (b)'den görüldüğü üzere, 113.5 MW değerine kadar artırılan Yük 11'in bağlı bulunduğu bara olan Bara 11'in gerilim değerini 1.05 pu'dan 0.89 pu'a düşürdüğü görülmüştür.

Yük 11’deki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.8 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında ise Yük 11’in değeri 103.5MW iken Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %102 seviyelerine çıkarak sistemi kararsızlığa götürmektedir.

Bara 12'ye bağlı Yük 12 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.9. Yük 12’nin alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 12’deki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 12 değeri, 6.1 MW'tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve Şekil 7.9 (a)'dan görüldüğü üzere, 86.1 MW yük değerine ulaşıldığında Line_0006_0012 hattında yüklenme oranı %104.91 olmuştur. Bu da iletim hattının aşırı yüklendiğini ve sınırları aştığını göstermektedir.

Yük 12’deki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7.9 (b)'den görüldüğü üzere, 111.1 MW değerinde Yük 12'nin

Bara 12'nin gerilim değerini 0.89 pu'a düşürdüğü görülmüştür. Bu, bara geriliminin belirli bir sınıra yaklaştığını göstermektedir.

Yük 12'deki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.9 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında, Yük 12'nin değeri 106.1 MW iken Gen_0006 generatörünün maksimum yüklenme oranına ulaşarak %100 olmuştur. Bu, generatörün maksimum kapasitesine ulaştığını ve daha fazla yükü besleyemeyeceğini göstermektedir.

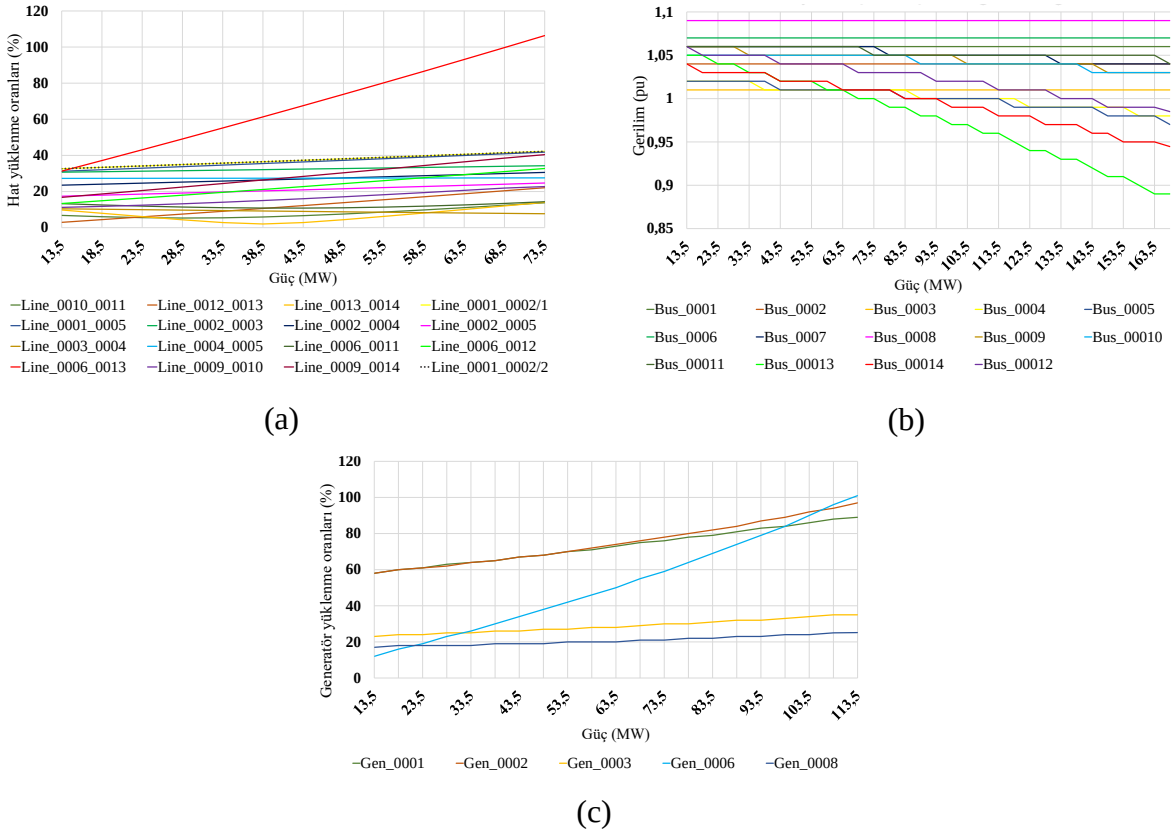
Burada Yük 12'deki yük artışının sistemin kararlı çalışması, iletim hattının, bara gerilimlerinin ve generatörlerin sınırlarının aşılmaması için 86 MW'a kadar sınırlandırılması gerekmektedir. Bu üst limit değeri ise hat yüklenmesine bağlı olarak belirlenmiştir.

Bara 13'e bağlı Yük 13 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 7.10'da gösterilmektedir.

Yük 13'teki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 13 değeri, 13.5MW'tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve Şekil 7.10 (a)'dan görüldüğü üzere, 73.5MW yük değerine ulaşıldığında Line_0006_0013 hattında yüklenme oranı %106.36 olmuştur. Ancak, artış kademeleri 5 MW olarak simüle edildiğinden, hat yüklenme oranı yaklaşık olarak 70 MW dolaylarında %100 seviyelerine ulaşmaktadır.

Yük 13'teki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7.10 (b)'de verilen grafiğe bakarak Yük 13'ün 168.5 MW değerine ulaştığında Bara 13'ün gerilim değerinin 0.89 pu'a düştüğü görülmüştür.

Yük 13'teki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.20 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında, Yük 13'ün değeri 168.5MW iken Gen_0006 generatörünün maksimum yüklenme oranını aşarak %106.36 olmuştur.

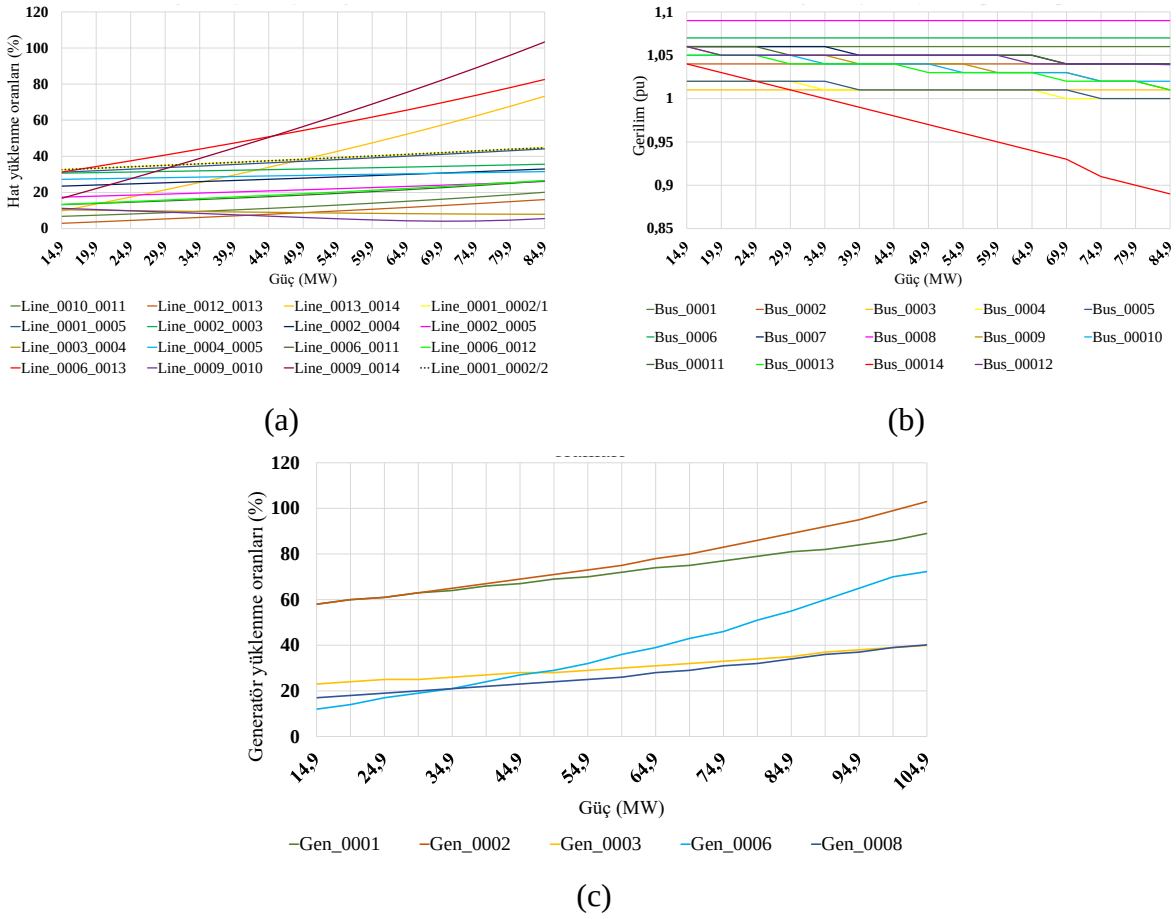


Şekil 7.10. Yük 13'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Sonuç olarak, bu üç durumun birlikte değerlendirilmesi sonucunda, Bara 13'e bağlı maksimum Yük 13 değerinin hat yüklenme oranından dolayı 70 MW dolaylarında olduğu sonucuna varılmıştır. Bu, sistemin kararlı çalışması ve iletim hattının, bara gerilimlerinin ve generatörlerin sınırlarının aşılmaması için önemlidir. Bu test sonucunda da hat yüklenme oranının sınırları aşılmadan Bara 13'e eklenebilecek maksimum yük miktarı belirlenmiştir.

Son olarak Bara 14'e bağlı Yük 14 değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 7.11'de verilmiştir.

Yük 14'teki Artışın Hat Yüklenme Oranlarına Etkisi: Yük 14 değeri, 14.9 MW'tan başlayarak kademeli olarak artırılmış ve Şekil 7.11 (a)'dan görüldüğü üzere, 84.9 MW yük değerine ulaşıldığında Line_0009_0014 hat yüklenme oranı %103 seviyelerinde olmuştur. Bu da 84.9 MW'lık bir yük olması durumunda iletim hattının aşırı yüklendiğini ve sınırları aştığını göstermektedir.



Şekil 7.11. Yük 14'ün alabileceği maksimum yük kapasiteleri a: Yük artışına bağlı hatların yüklenme oranları, b: Yük artışına bağlı baraların gerilim değerleri, c:Yük artışına bağlı generatörlerin yüklenme oranları

Yük 14'teki Artışın Bara Gerilimlerine Etkisi: Yük artışının bara gerilimleri üzerindeki etkisi Şekil 7.11 (b)'de incelenmiş ve Yük 14, 84.9 MW değerinde iken Bara 14'ün gerilim değeri 1.03 pu'dan 0.89 pu'a düşmektedir.

Yük 14'teki Artışın Generatör Yüklenme Oranlarına Etkisi: Şekil 7.11 (c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında ise Yük 14'teki artış ile yük değeri 104.9 MW değerine ulaştığında Gen_0002 generatörü yüklenme oranı %103 seviyelerine çıkarak sistemi kararsızlığa götürmektedir.

Hat yüklenmeleri, bara gerilimleri ve generatör yüklenmelerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, Bara 14'e bağlı Yük 14 değerinin maksimum 84.9 MW değere artırıldığında hat yüklenme oranı ve gerilim sınırı (0.89 pu) limitleri dışına çıktığı için Yük 14 için uygun bir değer belirlenmelidir.

Bu analizlerle güç sistemlerine yeni eklenecek yüklerin sistem parametreleri üzerinde etkisi görülmüştür. Buna göre hat yüklenme seviyeleri, bara gerilimleri ve generatör yüklenme oranları dikkate alınarak, sistemin maksimum yüklenme sınırlarını belirleyen unsurlar tespit edilmiştir. Maksimum yüklenme sınırını belirlemek için yapılan yük artışları sonucunda, her yük noktasının hangi sistem parametresi üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Verilen grafiksel sonuçlar, 2. yükten 9. yüke kadar generatör yüklenme oranlarının kısıtlayıcı parametre olduğunu göstermiştir. Diğer yük değerinde yapılan artışlarda ise ilk olarak hat yüklenme sınırları aşılmıştır. Bununla birlikte 14. yük değerindeki artış, hem 9-14'üncü baralar arasındaki hat yüklenme oranının aşılmasına hem de 14. baranın eşik gerilim değerinin altına düşmesine neden olmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yük artışlarının belirlenen üç kriter üzerinde de etkili olduğu söylenebilir. Bununla birlikte yeni yüklerin eklenmesi durumunda sistem kararlılığı sağlanması için daha önce belirtilen yöntemlerden yeni kaynak eklenmesi veya mevcut kaynak kapasitelerinin artırılması gerekmektedir.

IEEE 14 bara sisteminde bulunan üretim kaynaklarının üst limitleri dahilinde mevcut kaynakların değerleri artırılarak bu olumsuzluklar giderilebilmektedir. Sistem kısıtları göz önünde bulundurularak mevcut kaynaklarla problemlerin çözülememesi durumunda yeni kaynak eklenmesi, kaynağın boyutu ve konumu önem kazanmaktadır.

7.2. Çözüm Önerilerinin Tespit Edilmesine Ait Benzetim Sonuçları

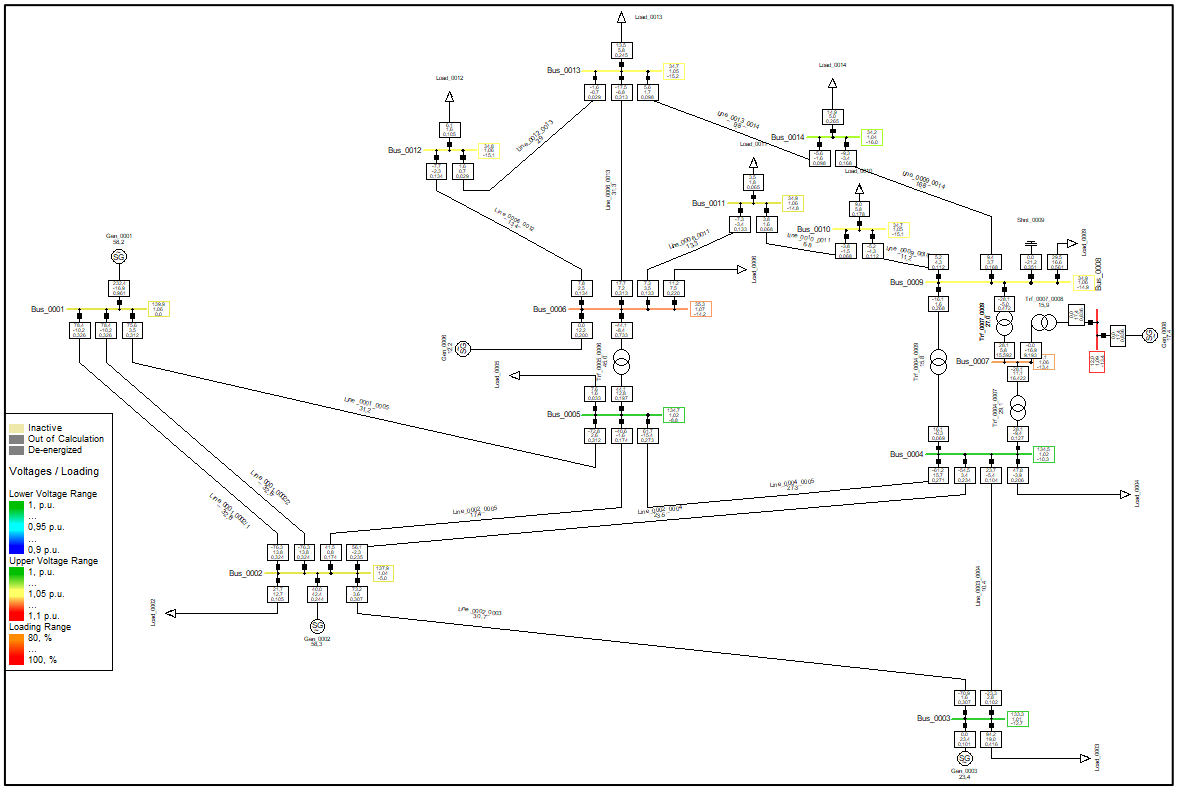
Bu bölümde 14 Baralı Test Sistemi üzerinde bozucu etkiler olması durumunda oluşturulan Script'ler ile olası çözümlerin belirlenmesine ait benzetim sonuçları verilmiştir. Bu bölümde sunulan sonuçlar sistemi kararsız durumdan kararlı duruma geçirecek tüm olasılıkları içermektedir. Dolayısıyla, elde edilen sonuçları optimum sonucun belirlenmesi için ön sonuçların elde edilmesi olarak da adlandırabiliriz.

7.2.1. Senaryo 1: 14 baralı test sisteminde tek noktada yük değerinin artışı durumunda çözüm önerilerinin tespiti

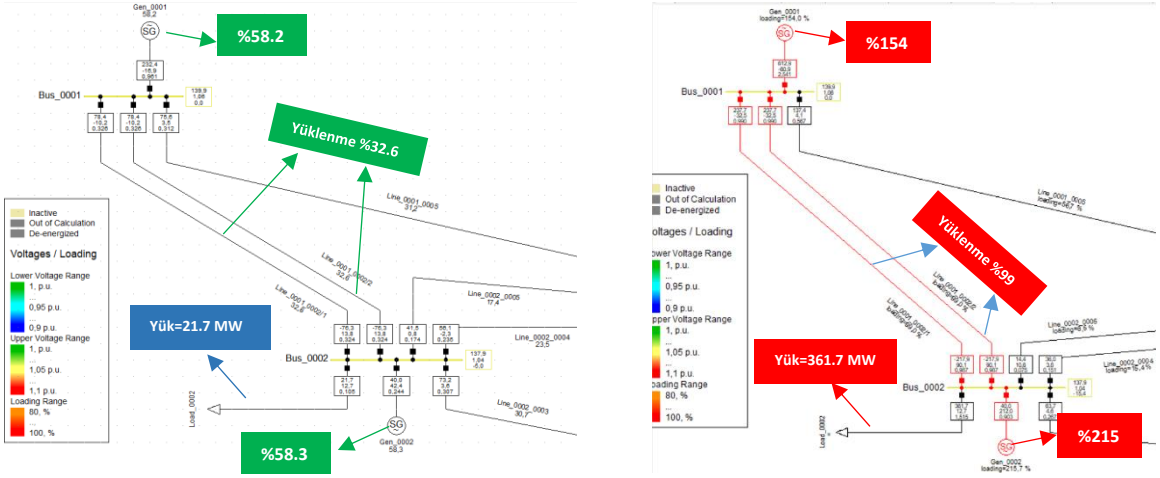
Bu bölümde 14 baralı test siteminde sistem parametre değerleri değiştirilmeden çalıştırıldığında DIgSILENT programındaki görüntüsü Şekil 7.12'de verilmiştir. Burada hat yüklenme değerleri %100'ün altında, bara eşik değerleri 0,90 pu ila 1,10 pu aralığında ve

generatör yüklenmeleri %100 sınır değerlerinin altındadır. Diğer bir deyişle sistem kararlı olarak çalışmaktadır. Bu esnada, Bara 2 (Bus_0002)'ye bağlı olan Yük 2'nin değeri 21.7 MW'tır. Sistemin kararlı çalışması için Yük 2 (Load_002)'nin alabileceği maksimum değerler daha önceki uygulamada hat yüklenme sınırının (>%90) aşılmaması için 361.7 MW'a kadar belirlenmişti (Bkz. Şekil 7.1).

Olası bir yük artış talebinde bu değerlerin üzerine çıkılması durumunda bazı hatlardaki yüklenmeler kritik seviyeye yaklaşmaktadır. Bu artış gerçek bir güç sistemine yeni kurulacak bir yerleşim yerinin veya sanayi bölgesinin dahil olması olarak düşünülebilir. Bu fikirden yola çıkarak, sistemin kararlı çalışmasını sürdürmesi için yapılabilecek planlamada ne kadarlık bir güç talebi olacağı ve sistem kararlılığının sürdürülmesi için kaynak yerlerinin belirlenmesi amacıyla çözüm önerileri sunulmaktadır. Yük 2 değeri 21.7 MW ve kritik değer olan 361.7 MW yapılarak sistem benzetimi yapıldığında oluşan hat yüklenme değerleri Şekil 7.13'te gösterilmiştir.



Şekil 7.12. IEEE 14 bara normal çalışma anındaki görüntüsü



(a) (b)

Şekil 7.13. IEEE 14 bara (a) Normal ve (b)Yüklü Çalışma anında hat yüklenmeleri

Şekil 7.13 (a)'da 21.7MW olan Yük 2 (Load_002) değeri ile hat yüklenmeleri kritik değerden oldukça düşük değerlerdedir. Yük 2 değeri 361.7 MW'a artırıldığında Şekil 7.13 (b)'de görüldüğü gibi Bara 1 ve Bara 2 arasındaki hatlarda yüklenme kritik değere ulaşmış ve kırmızı renkle ifade edilmiştir. Bu artış sistemdeki güç akışını bozarak üretim kaynaklarının da aşırı yüklenmelerine ve hatlardaki yüklenme seviyelerine etki etmektedir. Güç sistemini bu kararsız çalışma yapısından, kararlı duruma geçirmek için gerekli kaynak güçleri ve konumları Python'da oluşturulan Script ile tespit edilmiştir. Çözüm arayışında girilen hat ve bara parametrelerinin kısıtları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Buna göre hat yüklenme oranları %99'un altında bara gerilimleri ise 0.89 pu-1.10 pu aralığında kalacak çözümler aranmış ve sonuçlar yazdırılmıştır. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak 30 farklı çözüm önerisi bulunmuştur ve elde edilen çözüm önerileri Şekil 7.14'te gösterilmiştir.

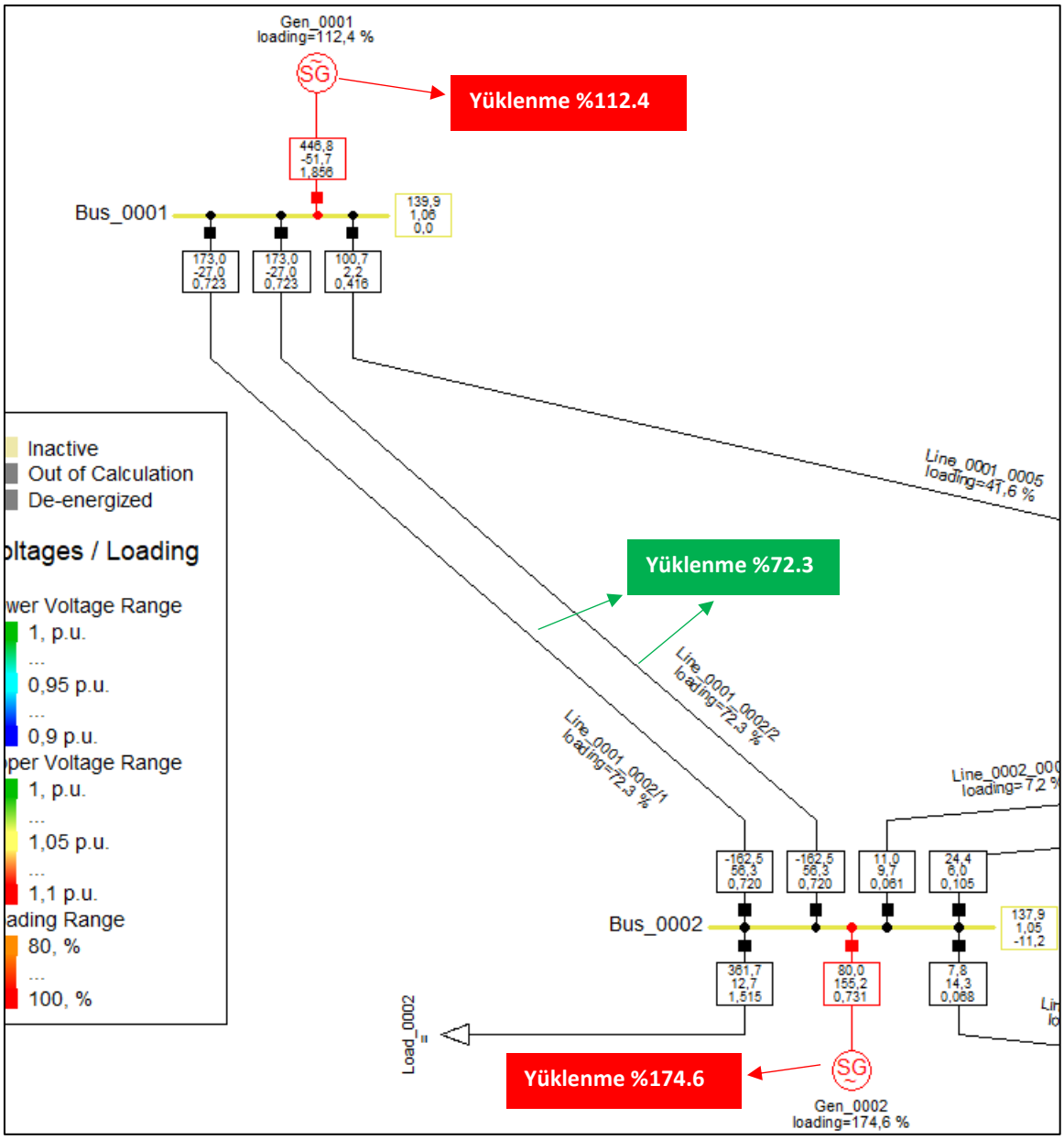
Çizelge 7.2. Çözüm Kısıtları

Kısıt		En Düşük	En Yüksek
Hat Yüklenme Oranları		-	%99
Bara Gerilimleri		0.89pu	1.10pu

	A	B	C	D	E	F
1	Cozum_No	G1	G2	G3	G6	G8
2	1. Cozum	0	40.0	0	0	0
3	2. Cozum	0	0	100.0	0	0
4	3. Cozum	0	0	0	100.0	0
5	4. Cozum	0	0	0	0	100.0
6	5. Cozum	88.0	40.0	0	0	0
7	6. Cozum	88.0	0	100.0	0	0
8	7. Cozum	88.0	0	0	100.0	0
9	8. Cozum	88.0	0	0	0	100.0
10	9. Cozum	0	40.0	100.0	0	0
11	10. Cozum	0	40.0	0	100.0	0
12	11. Cozum	0	40.0	0	0	100.0
13	12. Cozum	0	0	100.0	100.0	0
14	13. Cozum	0	0	100.0	0	100.0
15	14. Cozum	0	0	0	100.0	100.0
16	15. Cozum	88.0	40.0	100.0	0	0
17	16. Cozum	88.0	40.0	0	100.0	0
18	17. Cozum	88.0	40.0	0	0	100.0
19	18. Cozum	88.0	0	100.0	100.0	0
20	19. Cozum	88.0	0	100.0	0	100.0
21	20. Cozum	88.0	0	0	100.0	100.0
22	21. Cozum	0	40.0	100.0	100.0	0
23	22. Cozum	0	40.0	100.0	0	100.0
24	23. Cozum	0	40.0	0	100.0	100.0
25	24. Cozum	0	0	100.0	100.0	100.0
26	25. Cozum	88.0	40.0	100.0	100.0	0
27	26. Cozum	88.0	40.0	100.0	0	100.0
28	27. Cozum	88.0	40.0	0	100.0	100.0
29	28. Cozum	88.0	0	100.0	100.0	100.0
30	29. Cozum	0	40.0	100.0	100.0	100.0
31	30. Cozum	88.0	40.0	100.0	100.0	100.0

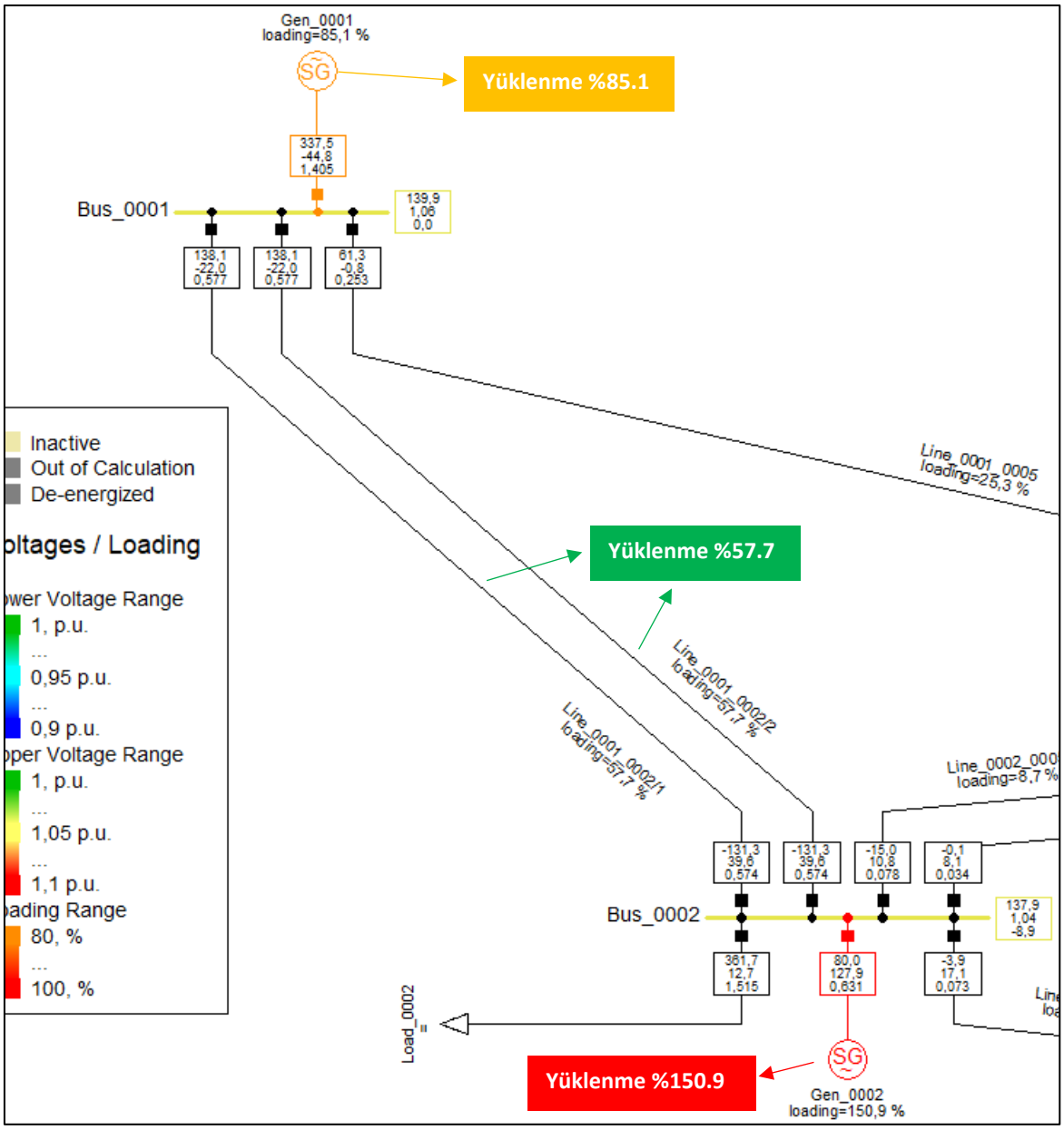
Şekil 7.14. Hat yüklenmelerini giderecek çözüm önerileri

Şekil 7.14'te gösterilen çözüm önerilerinden bazıları sistemde denenmiştir. Buna göre tabloda belirtilen çözüm önerilerinden 15.Çözüme göre; Generatör 1'in değeri 88 MW, Generatör 2'nin değeri 40 MW ve Generatör 3'ün değeri 100 MW artırılmıştır. Bu değerlere göre benzetim çalıştırılarak elde edilen hat ve bara görüntüleri Şekil 7.15'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, yük artışıyla birlikte kritik değere ulaşan Line_0001_0002 hattındaki yüklenme oranı %99'dan %72.3'e düşmüştür. Ayrıca diğer hatlarda da yüklenme oranları düşüş göstermiştir. Daha önce yüklenme anında %154 olan Gen_0001'in değeri yeni eklenen kaynaklar ile %112'ye, %215 yüklenmeye sahip Gen_0002'nin değeri ise %174'e kadar gerilemiştir. Fakat generatörler incelendiğinde yüklenme oranları kritik değer olan %100'ün üzerinde olmuştur.



Şekil 7.15. Çözüm 15 uygulamasında hattın ve baranın görüntüsü.

Şekil 7.14'te belirtilen çözüm önerilerinden bir diğeri olan 25.çözüme göre; Generatör 1'in değeri 88 MW, Generatör 2'nin değeri 40 MW, Generatör 3'ün değeri 100 MW ve ilave olarak Generatör 6'nın değeri 100 MW olarak belirlenmiştir. Benzetim bu parametrelerle çalıştırıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 7.16'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, Line_0001_0002 hattındaki yüklenme oranı %99'dan %57,7'ye düşmüştür. Generatör yüklenmeleri ise sırasıyla Gen_0001 için %85, Gen_0002 için ise %150 dolaylarındadır.

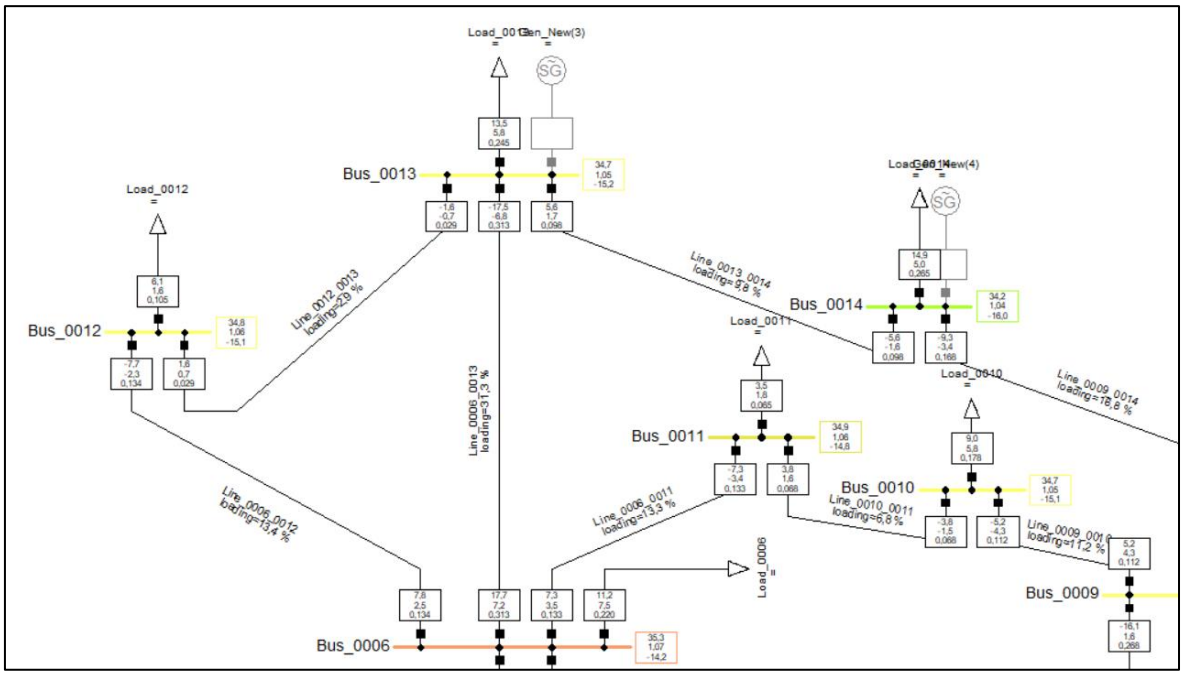


Şekil 7.16. Çözüm 25 uygulamasında hattın ve baranın görüntüsü.

Bu senaryo ve çözüm önerileri ile sistemde meydana gelen hat yüklenme ve bara gerilimi düşüşü problemleri çözülmüştür. Fakat sistem genel olarak incelendiğinde yük artış miktarı 340 MW iken çözüm için eklenen kaynak boyutu toplamda Çözüm 15 için 228 MW, Çözüm 25 için ise 328 MW olmuştur. Bu durumda hat yüklenme problemleri ve bara gerilim düşüşü problemleri çözülürken generatörler mevcut yükü karşılayamamakta ve generatör yüklenmeleri fazla olmaktadır. Bu da yeni çözüm önerilerinde bu üç kriteri sağlayan çözümlerin üretilmesini zorunlu kılmaktadır.

7.2.2. Senaryo 2: 14 baralı test sisteminde farklı noktalarda yük değerinin artışı durumunda çözüm önerilerinin tespiti

Bu senaryoda farklı noktalarda (Bara 12 (Bus_0012) ve Bara 13 (Bus_0013)) yer alan yükler Yük 12 (Load_0012) ve Yük 13 (Load_0013)'e artış durumundaki çözüm önerileri listelenmiştir. Yük artışının etkisini karşılaştırmalı görmek adına öncelikle sistem standart değerlerle çalıştırılmış ve benzetim ekranı görüntüsü Şekil 7.17'de verilmiştir.

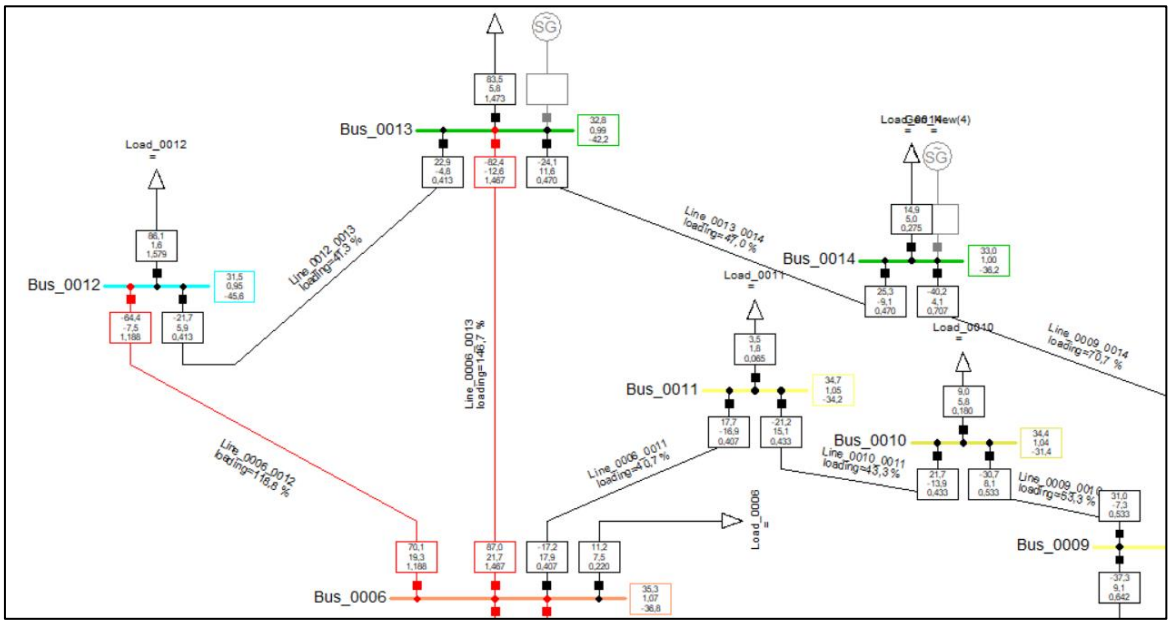


Şekil 7.17. Yük 12 ve Yük 13 Normal Çalışma

Daha önce Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da gösterilen uygulamada Yük 12 ve Yük 13 için maksimum seviye sırasıyla, 86 MW ve 70 MW belirlenmişti. Buna göre, Bara 12'ye bağlı olan 6.1 MW olan Yük 12'nin değeri 80 MW artırılarak 86.1 MW'a, 13.5 MW olan Yük 13'ün değeri ise 70 MW artırılarak 83.5 MW'a yükseltilmiştir. Sistemin farklı kıstaslar altında da çalışabilirliğini test etmek adına, Senaryo 1'den farklı olarak bu senaryoda hat yüklenmesi kısıtı %99 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere sistem çalıştırıldığında sistem görüntüsü Şekil 7.18'deki gibidir.

Bara gerilimleri ve hat değerlerinde değişimler nümerik olarak Çizelge 7.3'te sunulmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere, bara gerilimlerinde en büyük değişim Yük 12'nin bağlı olduğu bara olan Bara 12'de meydana gelmiştir. Normal çalışmada 1.06 pu olan Bara 12'nin gerilim değeri 0.95 pu'a düşmüştür. Bu belirlenen sınırlar içerisindedir. Hat yüklenme

oranlarında ise, Hat_0006_0012 ve Hat_0006_0013 sınır değerlerin çok üzerinde yüklenmiştir.



Şekil 7.18. Yük artışının sistem üzerine etkisi

Çizelge 7.3. Yük artışının değerler üzerine etkisi

Sistem Bileşeni	Yük 12=6.1 MW Yük 13= 13.5 MW	Yük 12=86.1 MW Yük 13= 83.5 MW
Bara 12	1.06 pu	0.95 pu
Bara 13	1.05 pu	0.99 pu
Bara 6	1.07 pu	1.07 pu
Bara 11	1.05 pu	1.06 pu
Bara 14	1.00 pu	1.00 pu
Bara 10	1.04 pu	1.04 pu
Hat _0012_0013	%2.9 Yüklenme	%41.3 Yüklenme
Hat_0006_0012	%13.4 Yüklenme	%118.8 Yüklenme
Hat_0006_0013	%31.3 Yüklenme	%146.7 Yüklenme
Hat_0006_0011	%13.3 Yüklenme	%40.7 Yüklenme
Hat _0013_0014	%9.8 Yüklenme	%47.0 Yüklenme
Hat _0010_0011	%6.8 Yüklenme	%43.3 Yüklenme

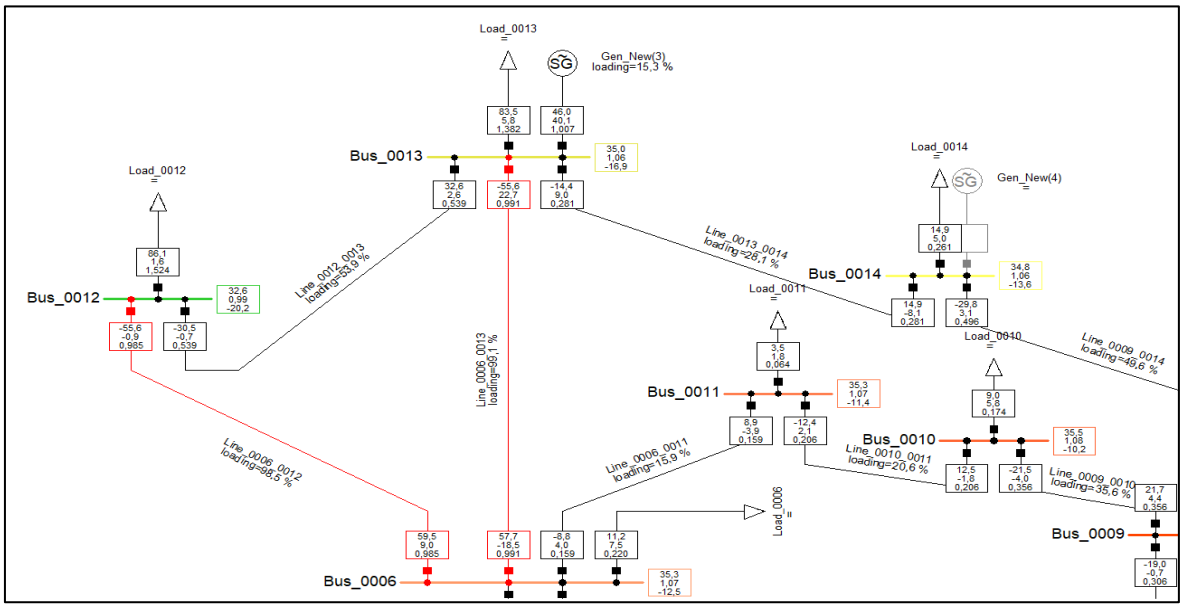
Bu yük artışı durumları ve kısıtlar ile çözüm Scripti çalıştırıldığında bu defa 225 farklı çözüm önerisi oluşmuştur. Bu çözüm önerilerinin bir bölümü Şekil 7.19'da görülmektedir. IEEE 14 bara sisteminde tanımlı olan 5 adet generatörün yanı sıra 4 farklı generatör daha tanımlanmıştır. Bu generatörler sistem çalışma esnasında devrede görülmemektedir. Sonuçlar incelendiğinde sistem parametreleri mevcut generatörlerle her iteresyonda tekrar

artırılarak uygun çözüm bulunamaması durumunda yeni kaynaklar aktif edilerek çözüm aramış bunun sonucunda da yeni kaynak boyutunu ve hangi baraya ekleneceğini göstermiştir.

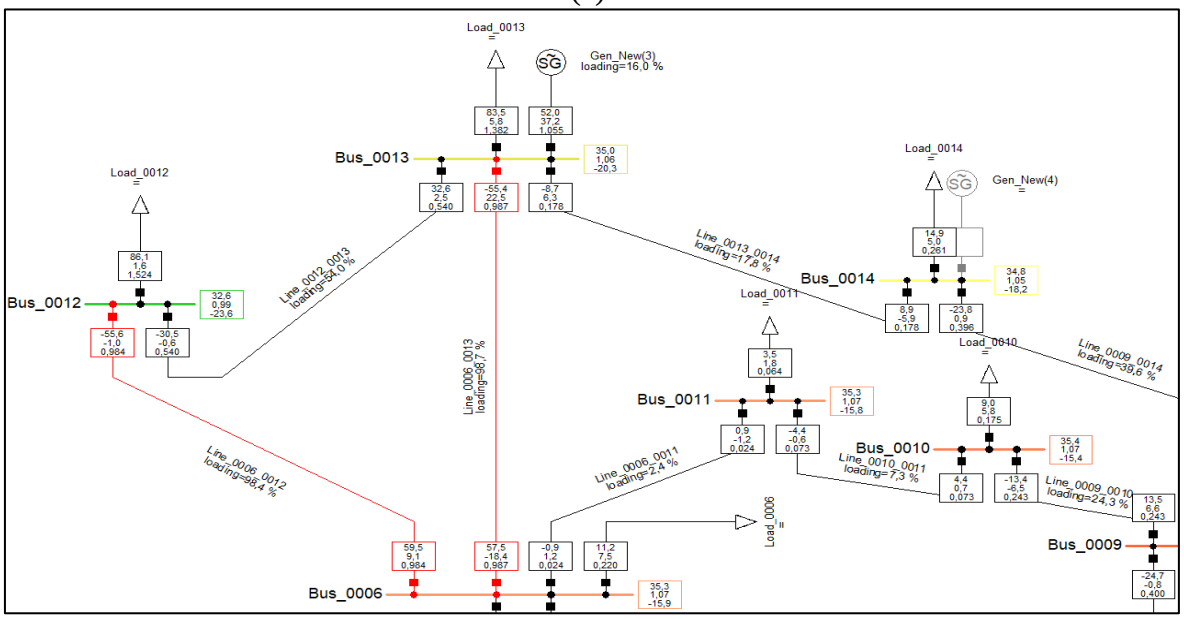
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Cozum_No		G1	G2	G3	G6	G8	G_Yeni1	G_Yeni2	G_Yeni3	G_Yeni4
2	1	Cozum	0	0	0	34,00	0	34	0	34	34
3	2	Cozum	0	40	40	0	40	40	40	40	0
4	3	Cozum	0	40	44	0	0	44	44	44	0
.....											
13	12	Cozum	0	0	0	0	41	41	0	41	0
14	13	Cozum	0	0	0	0	0	44	44	44	0
15	14	Cozum	0	40	0	0	41	41	0	41	0
16	15	Cozum	45	40	46	46	46	46	46	46	0
17	16	Cozum	0	29	0	0	29	29	29	29	29
18	17	Cozum	0	40	44	0	0	0	0	44	0
19	18	Cozum	0	29	29	0	29	0	0	29	29
...											
25	24	Cozum	0	30	0	0	0	30	0	30	30
26	25	Cozum	0	30	0	0	0	0	0	30	30
27	26	Cozum	0	0	47	47	47	47	0	47	0
28	27	Cozum	0	0	47	47	47	47	0	47	0
29	28	Cozum	0	0	0	52	0	52	52	52	0
30	29	Cozum	0	0	52	52	0	0	0	52	0
31	30	Cozum	0	40	0	46	46	0	46	46	0
.....											
69	68	Cozum	30	0	0	0	0	0	0	45	0
70	69	Cozum	40	0	44	0	0	0	44	44	0
71	70	Cozum	30	0	0	0	41	0	0	41	0
72	71	Cozum	29	0	41	0	41	41	0	41	0
73	72	Cozum	0	40	0	0	41	41	41	41	0
.....											
123	122	Cozum	0	0	0	0	29	29	0	29	29
124	123	Cozum	0	0	0	0	0	0	0	45	0
125	124	Cozum	0	29	0	0	29	29	29	29	29
.....											
200	199	Cozum	0	0	0	34	0	0	0	34	34
201	200	Cozum	0	31	0	31	31	31	31	31	31
202	201	Cozum	0	33	0	33	0	33	33	33	33

Şekil 7.19. Yük 12 ve 13'ün artışı için önerilen çözümler

Şekil 7.19'da gösterilen çözüm önerileri içerisinden en az güç artışı gerektiren çözümlerden 123. Çözüm, en çok güç artışı gerektiren çözüm önerilerinden 15. Çözüm, en fazla farklı lokasyonda yeni kaynak kullanımı gerekitiren 200. Çözüm, mevcut kaynak artışı ile birlikte en az yeni kaynak gücü gerektiren 70. Çözüm ve en fazla yeni kaynak gücü gerektiren gerektiren 28. Çözüm önerileri seçilerek model üzerinde denendiğinde ortaya çıkan sistem görüntüleri sırasıyla, Şekil 7.20'de verilmiştir.

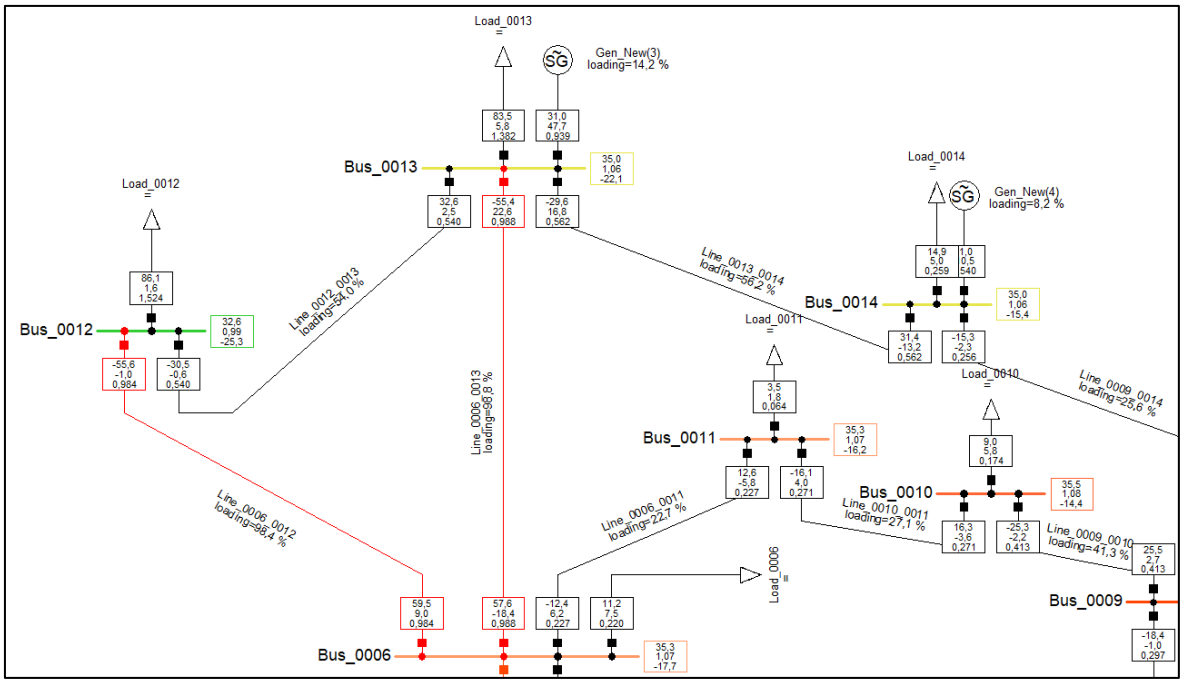


(a)

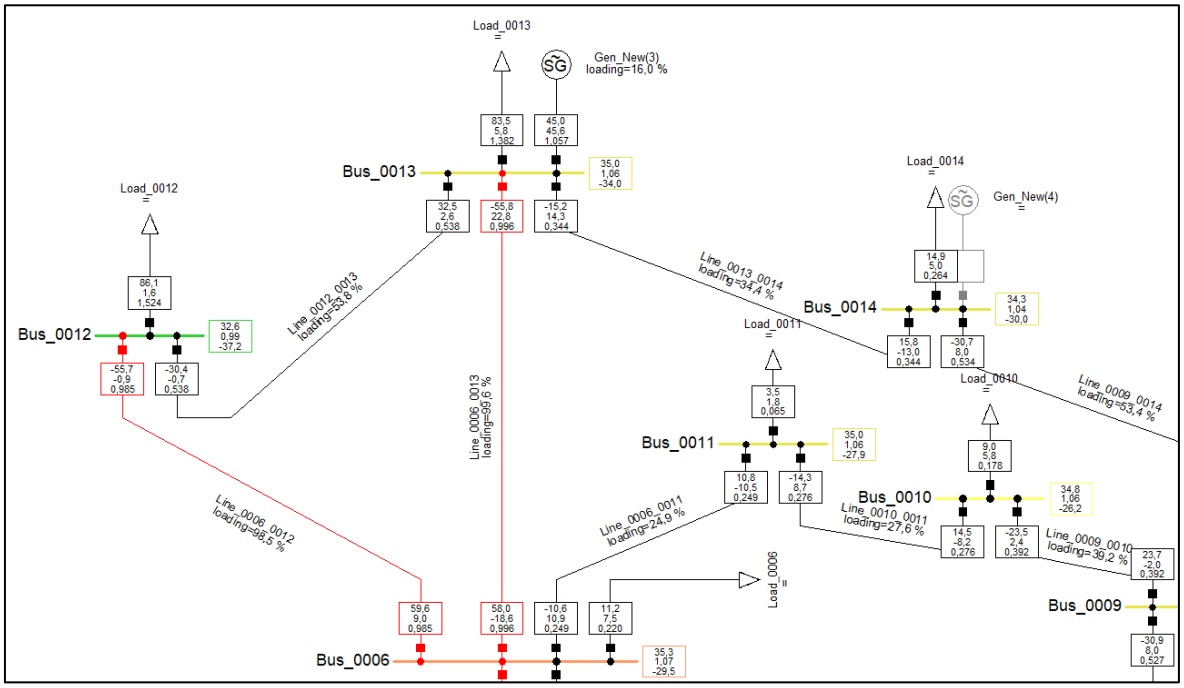


(b)

Şekil 7.20. Yük12 ve Yük 13'teki güç artışları için önerilen çözümlerin uygulama görüntüleri (a) 15. Çözüm için Sistem Görüntüsü (b) 28. Çözüm için Sistem Görüntüsü (c) 200. Çözüm için Sistem Görüntüsü (d) 123. Çözüm için Sistem Görüntüsü (e) 70. Çözüm için Sistem Görüntüsü

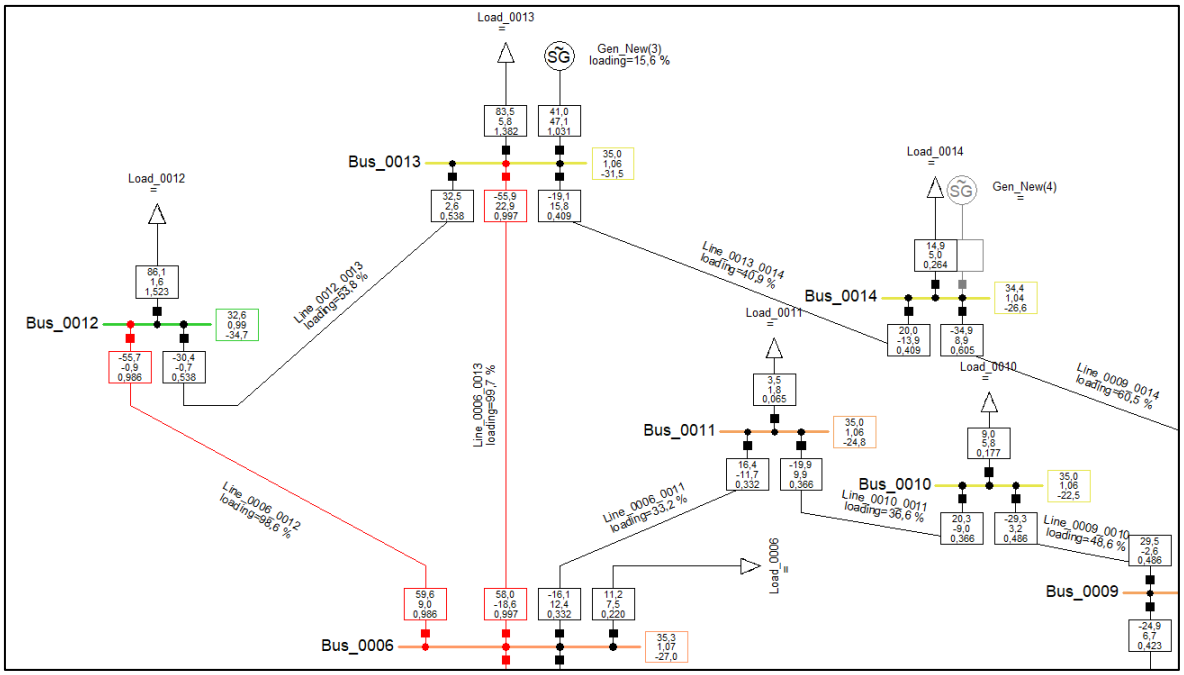


(c)



(d)

Şekil 7.21. (devam) Yük12 ve Yük 13'teki güç artışları için önerilen çözümlerin uygulama görüntüleri (a) 15. Çözüm için Sistem Görüntüsü (b) 28. Çözüm için Sistem Görüntüsü (c) 200. Çözüm için Sistem Görüntüsü (d) 123. Çözüm için Sistem Görüntüsü (e) 70. Çözüm için Sistem Görüntüsü



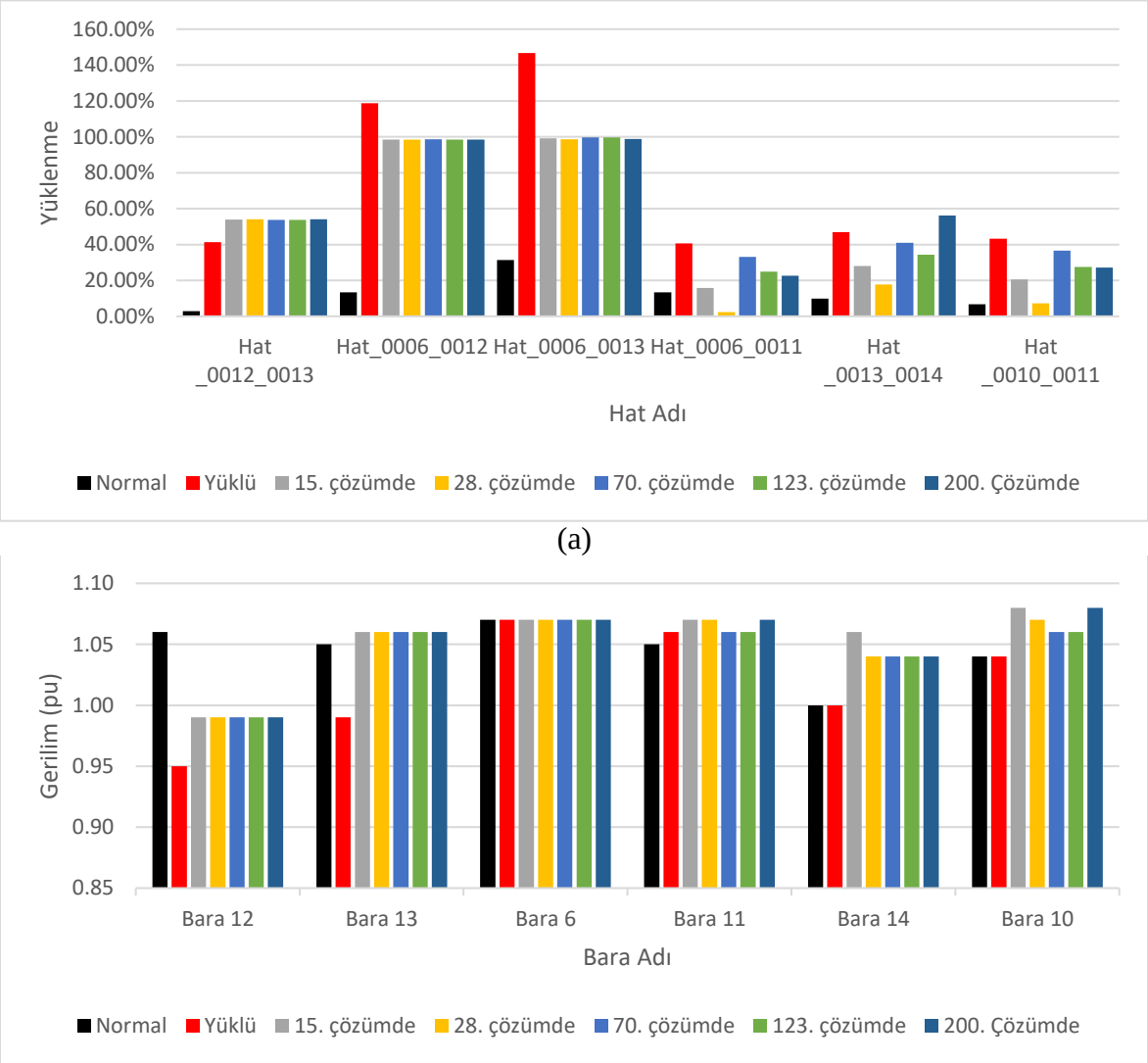
(e)

Şekil 7.22. (devam) Yük12 ve Yük 13'teki güç artışları için önerilen çözümlerin uygulama görüntüleri (a) 15. Çözüm için Sistem Görüntüsü (b) 28. Çözüm için Sistem Görüntüsü (c) 200. Çözüm için Sistem Görüntüsü (d) 123. Çözüm için Sistem Görüntüsü (e) 70. Çözüm için Sistem Görüntüsü

Şekil 7.20 (a)'da verilen Çözüm 15'in benzetim programında uygulanması incelendiğinde hat yüklenme oranları kritik değer olan %100'ün altına düştüğü, bara gerilimlerinin ise 0.90-1.10 pu arasında olduğu görülmüştür. Aynı şekilde Şekil 7.20 (b), Şekil 7.20 (c), Şekil 7.20 (d) ve Şekil 7.20 (e) verilen benzetim programının görüntülerinden hat yüklenlenme oranlarının %100'ün altına düştüğü, yeni kaynak kombinasyonları ile hat yüklenme oranlarının farklılık gösterdiği görülmüşütür.

Bu çözümler uygulandığında en çok etkilenen parametreler ve ortaya çıkan sonuçlar Şekil 7.21'de gösterilmektedir. Şekil 7.21 (a)'da verilen grafikten bu çözümlerin hat yüklenme oranları, Şekil 7.21 (b)'de bara gerilimleri incelendiğinde tüm çözümlerin kararlık problemlerini giderdiği görülmektedir. Özellikle artışa maruz kalan yüklerin bağlı bulunduğu baralara bağlı olan hatlardan Hat_0006_0012 ve Hat 0006_0013'te hat yüklenmeleri kritik değer olarak tanımladığımız %100'ün altına düştüğü görülmüştür. Bu çözümler yük artışındaki limitleri de gözetmekte dolayısıyla üretim-tüketim dengesini de gözeterek sonuç vermiştir. Bu örnek senaryolar incelendiğinde güç sisteminde yük artışından kaynaklı ortaya çıkacak kararsızlıkların giderilmesi yeni kaynak eklenmesi ile

sağlanabilmektedir. Örnek çözüm önerinden manuel girilen değerler incelendiğinde tüm öneriler sistemi kararsızlık durumundan kurtarmaktadır. Manuel olarak girilen çözüm önerilerinden en uygun çözüm yük artışının olduğu baralarda güç artışına gitmek gibi görünse de bu çözüm hat yüklenme, bara gerilim düşümü gibi problemlerde her zaman çözüm olmamaktadır. Ayrıca birden fazla çözüm seçeneği bulunmaktadır. Bu çözümler manuel olarak girildiğinde çok fazla olasılık olmaktadır ve karşılaştırma yapılması zordur.



Şekil 7.23. Çözümlerin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri

Bu bölümde sunulan sonuçlar doğrultusunda, elde edilen çözüm önerilerine üretim için alt-üst limitler dahil edildiğinde, hat maliyetleri, mesafeler, bölgelerin enerji üretim kapasiteleri, gelecekteki yük artış öngörüleri gibi değişen etkenler göz önüne alındığında problem daha

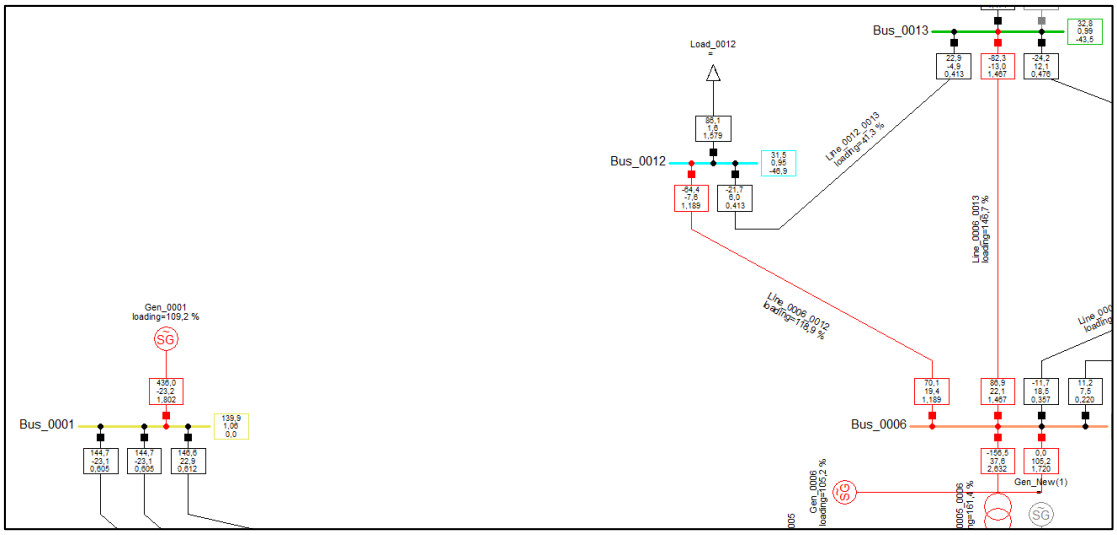
da karmaşık hale gelmektedir. Bu karmaşık problemlerin çözümleri içerisinden optimum çözümü bulmak için metasezgisel algoritmalardan faydalanmak gerekmektedir. Böylelikle çok fazla çözüm önerisi içerisinden yük akışı, hat yüklenmeleri, generatör yüklenmeleri, bara gerilim düşümleri ve hat maliyetleri arasından en uygun optimum çözümleri elde edilebilecektir.

7.3. Optimum Kaynak Boyutu ve Yerinin BOA Kullanılarak Belirlenmesine Ait Benzetim Sonuçları

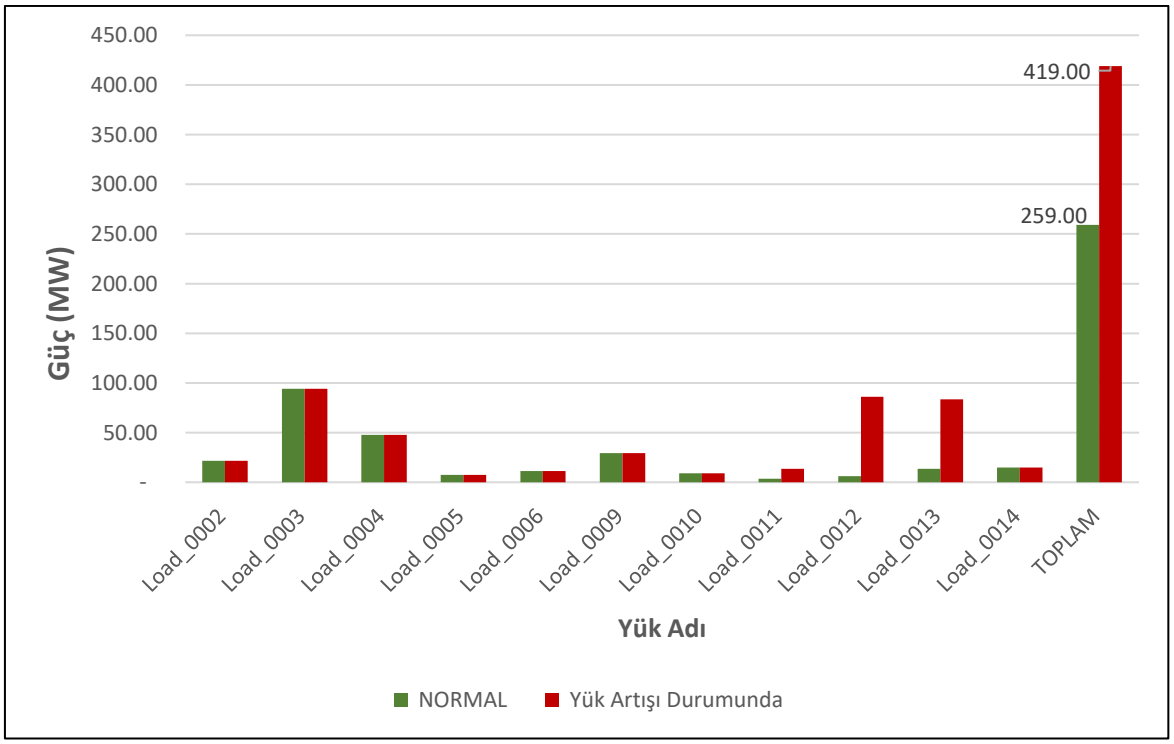
Önceki senaryolardan, yük artışına bağlı olarak hat yüklenmeleri, bara gerilim düşüşleri, generatör yüklenmeleri gibi durumların gerilim kararsızlığına yol açtığı bilinmektedir. Kararsızlığa yok açan bu sorunların ortadan kaldırılması için olası çözüm önerileri önceki benzetim çalışmalarında sunulmuştu. Bu bölümde, önceki benzetimlerden elde edilen çözüm önerileri arasından optimum olanların Bozkurt Optimizasyon Algoritması ile tespit edilmesine ait sonuçlar sunulmuştur.

7.3.1. Senaryo 3: farklı noktalarda yük değerinin artışı, çözüm üretilmesi ve BOA ile optimum çözüm seçimi

Senaryo 2'ye benzer olarak, Çizelge 7.1'de verilen standart değerlerden Yük 11'in değeri 3.5 MW'tan 12.5 MW'a, Yük 12'nin değeri 6.10 MW'tan 86.10 MW'a ve Yük 13'ün değeri ise 13.5 MW'tan 83.50 MW'a yükseltilerek toplamda 160 MW'lık bir yük artışı tanımlanmıştır. Bu koşullar altında yapılan benzetim çalışmasına ait ekran görüntüsünün bir bölümü Şekil 7.22'de verilmiştir. Hatlardan bazılarının yüklenme sınırı olarak belirttiğimiz değerin üzerine çıkmış olduğu (kırmızı renkli hatlar) görülmektedir. Ayrıca yük artışına bağlı olarak sistemde bulunan kaynakların yetersiz kaldığı, yükü beslemek için aşırı yüklendiği, buna bağlı olarakta yine kırmızı renkli olarak işaretlendiği görülmektedir. IEEE 14 Bara Test Sistemindeki standart yük güçleri ve yük artışı koşullarındaki güç değerleri Şekil 7.23'te verilmiştir. Buradaki grafikten görüldüğü üzere normal çalışma koşullarında sistemde 259 MW olan toplam yük değeri farklı baralarda bağlı yüklerin artışı ile 419 MW çıkmıştır. Bu durumda sisteme dahil edilecek kaynaklar ile üretim kapasitesi bu gücü karşılamak durumundadır.

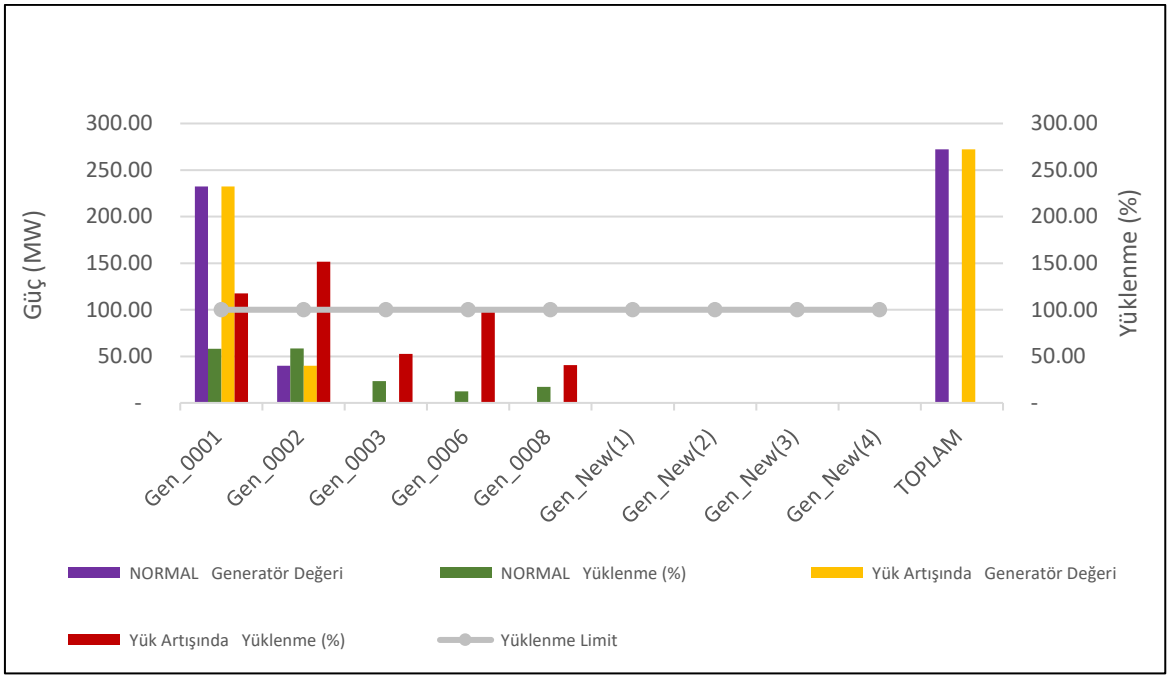


Şekil 7.24. Farklı Noktalarda 160 MW'lık Yük Artışı Olması Durumunda Sistem Görüntüsü

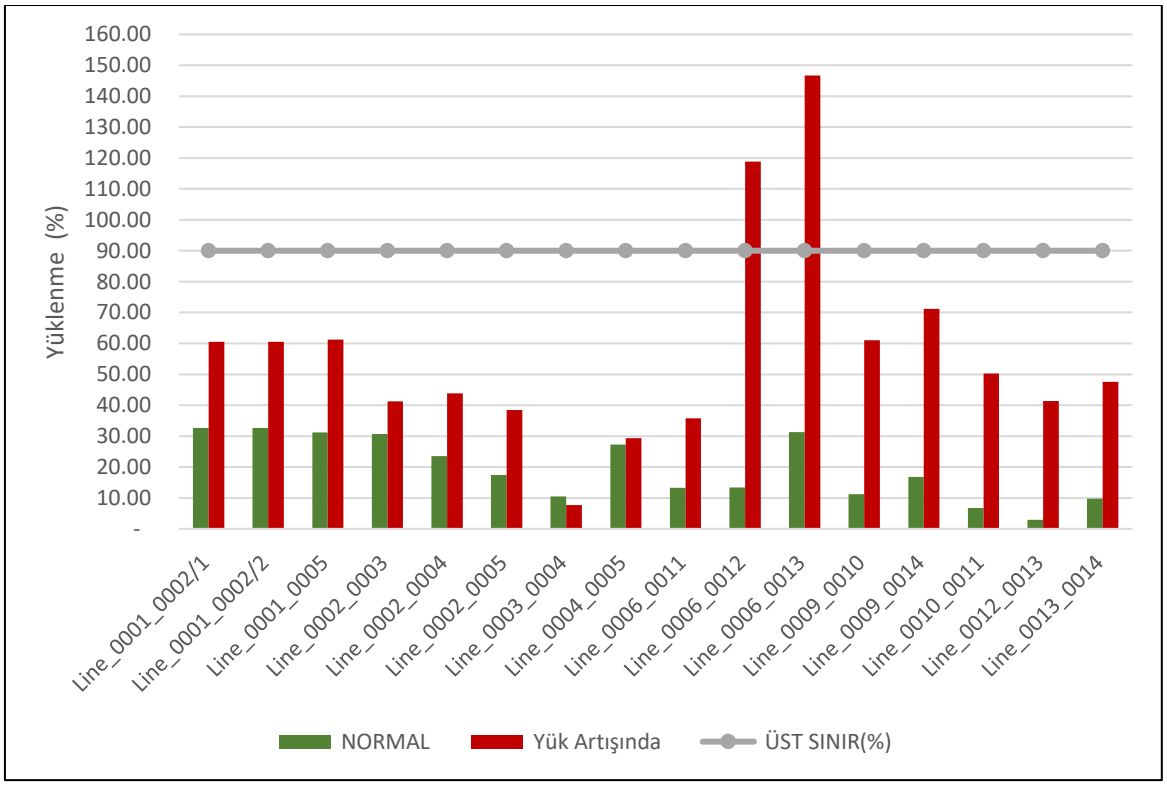


Şekil 7.25. Normal Çalışma ve Aşırı Yüklenme Durumlarında Yük Değerleri

Yük artışına bağlı olarak meydana gelen problemler güç sistemi üzerinde incelendiğinde ve normal çalışma koşulları ile karşılaştırıldığında, generatör yüklenme oranları, hat yüklenme oranları ve bara gerilim değerleri Şekil 7.24'teki gibi olmaktadır.

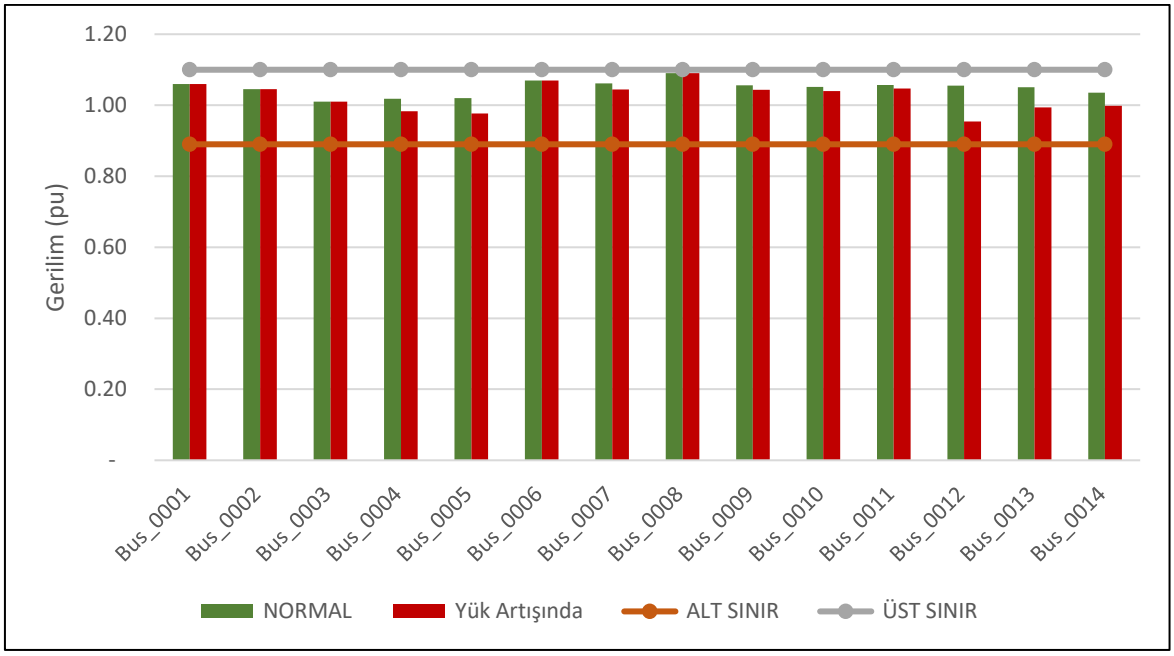


(a)



(b)

Şekil 7.26. Normal Çalışma ve Yüklenme Durumlarında (a) Generatör Yüklenme Oranları, (b) Hat Yüklenme Oranları (c) Bara Gerilim Değerleri



(c)

Şekil 7.27. Normal Çalışma ve Yüklenme Durumlarında (a) Generatör Yüklenme Oranları, (b) Hat Yüklenme Oranları (c) Bara Gerilim Değerleri

Şekil 7.24 (a)'da verilen generatör değerleri ve yüklenme oranları incelendiğinde, güç sisteminde yük artışına bağlı olarak bazı generatörlerde (Gen_0001, Gen_0002_Gen_0006) yüklenme oranları kritik seviyeye yaklaşmış veya geçmiştir. Şekil 7.24 (b)'de ise hat yüklenmeleri incelendiğinde yük artışına bağlı olarak değişen yük akışı hatlarda yüklenme oranlarında artışıa yol açmıştır. Bu artış Yük 12 ve Yük'13 ün bağlı bulunduğu baralarla ilişkili olan Line_0006_00012 ile Line_0006_0013 hatlarında kritik değerin üzerinde olmuştur. Şekil 7.24 (c)'de verilen bara gerilimleri incelendiğinde ise yük artışına bağlı olarak 12 ve 13 numaralı baralarda gerilim düşüşleri görülmüştür.

Sistemi kararlı bölgeye geçirecek olası çözümlerin bulunması için oluşturulan script çalıştırılmış ve 50 farklı çözüm önerisi bulunmuştur. Çözüm önerilerinin bir bölümü Şekil 7.25'te görülmektedir.

Cozum_No	G1	G2	G3	G6	G8	G_Yeni1	G_Yeni2	G_Yeni3	G_Yeni4
1. Cozum	86	0	0	0	0	0	0	86	0
2. Cozum	79	0	0	0	79	0	0	79	0
3. Cozum	85	0	85	0	0	0	0	85	0
4. Cozum	87	0	0	0	0	87	0	87	0
5. Cozum	59	0	0	0	0	0	0	59	59
6. Cozum	87.6	0	0	92	92	0	0	92	0
7. Cozum	65	0	0	65	0	0	0	65	65
8. Cozum	78	0	78	0	78	0	0	78	0
9. Cozum	80	0	0	0	80	80	0	80	0
10. Cozum	78	0	0	0	78	0	78	78	0
11. Cozum	55	0	0	0	55	0	0	55	55
12. Cozum	86	0	86	0	0	86	0	86	0
13. Cozum	84	0	84	0	0	0	80	84	0
14. Cozum	58	0	58	0	0	0	0	58	58
15. Cozum	59	0	0	0	0	59	0	59	59
16. Cozum	58	0	0	0	0	0	58	58	58
17. Cozum	87.6	0	91	91	91	0	0	91	0
18. Cozum	87.6	0	0	93	93	93	0	93	0
19. Cozum	61	0	0	61	61	0	0	61	61
20. Cozum	65	0	65	65	0	0	0	65	65
21. Cozum	65	0	0	65	0	65	0	65	65
22. Cozum	64	0	0	64	0	0	64	64	64
23. Cozum	79	0	79	0	79	79	0	79	0
24. Cozum	77	0	77	0	77	0	77	77	0
25. Cozum	55	0	55	0	55	0	0	55	55
26. Cozum	79	0	0	0	79	79	79	79	0
27. Cozum	56	0	0	0	56	56	0	56	56
28. Cozum	55	0	0	0	55	0	55	55	55
29. Cozum	85	0	85	0	0	85	80	85	0
30. Cozum	59	0	59	0	0	59	0	59	59
31. Cozum	58	0	58	0	0	0	58	58	58
32. Cozum	58	0	0	0	0	58	58	58	58
33. Cozum	87.6	0	92	92	92	92	0	92	0
34. Cozum	61	0	61	61	61	0	0	61	61
35. Cozum	61	0	0	61	61	61	0	61	61
36. Cozum	60	0	0	60	60	0	60	60	60
37. Cozum	65	0	65	65	0	65	0	65	65
38. Cozum	64	0	64	64	0	0	64	64	64
39. Cozum	65	0	0	65	0	65	65	65	65
40. Cozum	78	0	78	0	78	78	78	78	0
41. Cozum	55	0	55	0	55	55	0	55	55
42. Cozum	55	0	55	0	55	0	55	55	55
43. Cozum	55	0	0	0	55	55	55	55	55
44. Cozum	58	0	58	0	0	58	58	58	58
45. Cozum	61	0	61	61	61	61	0	61	61
46. Cozum	60	0	60	60	60	0	60	60	60
47. Cozum	61	0	0	61	61	61	61	61	61
48. Cozum	64	0	64	64	0	64	64	64	64
49. Cozum	55	0	55	0	55	55	55	55	55
50. Cozum	60	0	60	60	60	60	60	60	60

Şekil 7.28. Çözüm Önerileri

Daha önceki senaryolarda bulunan çözüm önerileri rastgele seçilmiş ve benzetim programında denenmişti. Bu defa bulunan 50 farklı çözüm, Bozkurt Optimizasyon Algoritmasına uygulanmış ve hat mesafeleri, kaynak konumları, toplam yük akışı ve hatların yüklenmeleri gibi parametreler dikkate alınarak Eş. 7.1'deki tanımlamalar ve eşitliklerde görüldüğü gibi bir BOA amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu amaç fonksiyonunda, mevcut çözüm önerisindeki üretim değerlerinin toplamı (Gen_{toplam}) ile standart çalışmadaki üretim ($Gen_{initial}$) değerleri oranlanarak normalize edilmiştir. Benzer durum hat mesafeleri için de yapılmıştır. Dolayısıyla, bu fonksiyonun 0'a yakınsanması, bu parametrelerin standart değerlerden minimum oranda sapması anlamı taşıyacaktır. Böylece, standart değerler ile kararlı çalışmasını sürdüren IEEE 14 Bara Test Sisteminin kararlı bölgesinden sapma en aza indirgenmiş olacaktır. Bu durumu sağlayacak optimum *x* ve *y* değerleri, Bozkurt Optimizasyon Algoritması kullanılarak bulunmuştur.

$$Gen_{Oran} = \frac{Gen_{toplam}}{Gen_{initial}}, \qquad Line\ Oran = \frac{Line_{Toplam}}{Line_{initial}}$$

$$|x.Gen_{Oran} - y.Line\ Oran| \cong 0 \tag{7.1}$$

Optimum x ve y değerleri (x_{opt} ve y_{opt})

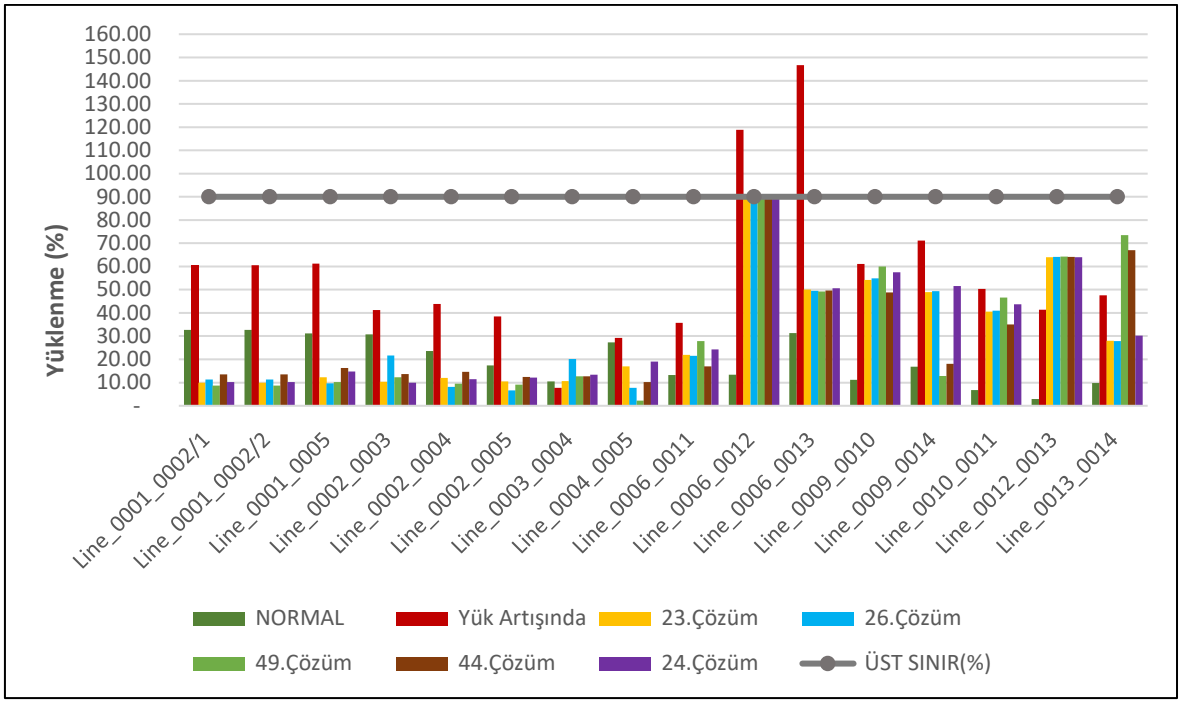
$$x_{opt}\,.Gen_{Oran} - y_{opt}.Line\ Oran \cong 0$$

Bu fonskiyonlarda çözümler içerisinden hat mesafeleri ve kaynak konumları, buna bağlı olarak meydana gelecek kayıplar dikkate alınarak sıfıra kümelenmiş en iyi çözümler listelenmiştir. Eş.7.1'de elde edilen "x_{opt}" ve "y_{opt}" değerli tüm çözümlerde aynı katsayı olarak çıkmakta ve diğer çözümlere uygulandığında en iyi sonuçları vermektedir. Benzetim modelinde elde edilen çözüm önerileri bu çerçevede optimizasyona tabi tutulduğunda, en iyi 5 çözüm BOA tarafından Çizelge 7.4'teki gibi sıralanmıştır.

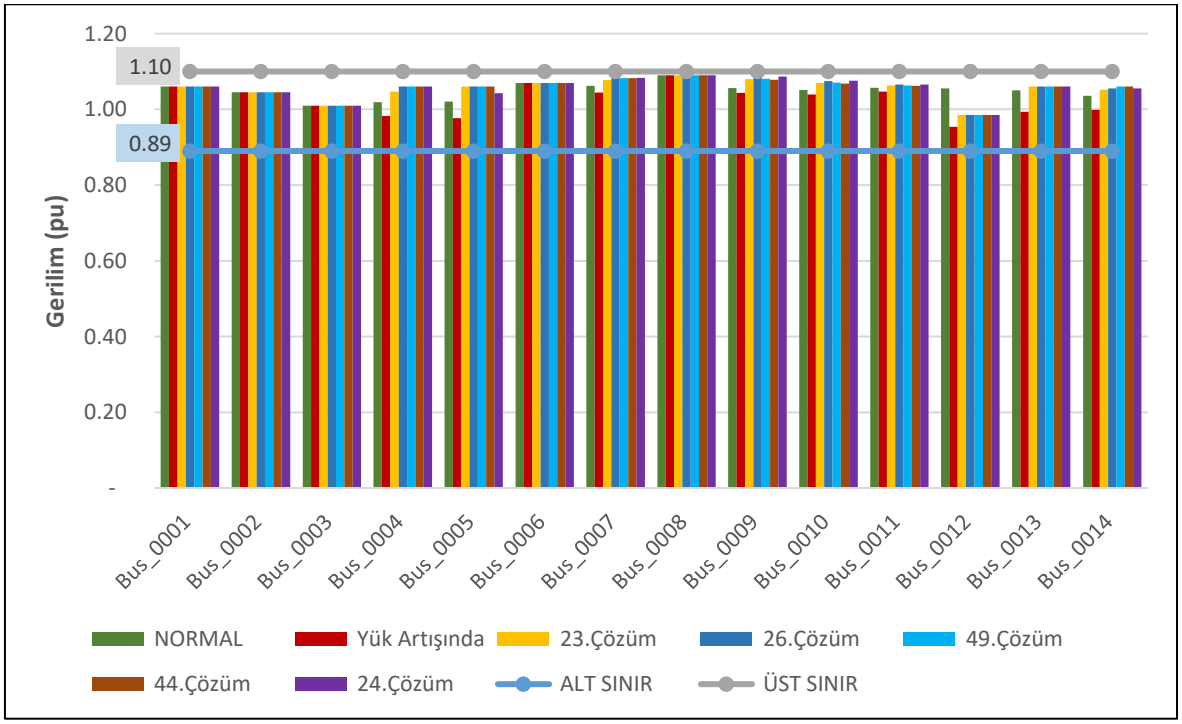
Çizelge 7.4. En iyi 5 Çözüm

EN_İYİ	G1	G2	G3	G6	G8	G_Yeni1	G_Yeni2	G_Yeni3	G_Yeni4
23. Çözum	79	0	79	0	79	79	0	79	0
26. Çözum	79	0	0	0	79	79	79	79	0
49. Çözum	55	0	55	0	55	55	55	55	55
44. Çözum	58	0	58	0	0	58	58	58	58
24. Çözum	77	0	77	0	77	0	77	77	0

Bu sonuçlara göre mevcut generatörlerin maksimum limitleri dâhilinde eklenecek güç kapasitelerinin yanısıra farklı baralara tanımlanan yeni generatörlerin değerleri ve yerleri belirlenmiştir. Bu çözüm önerileri benzetim programına uygulandığında yeni parametrelerle sistem göstergeleri Şekil 7.26'da görüldüğü gibidir. Grafiklerden görüldüğü üzere yük artışı olması durumunda herhangi bir kaynak eklenmez ise hat yüklenme oranlarında ciddi artışlar olmaktadır. Şekil 7.26 (a)'da verilen hat yüklenme oranlarına bakıldığında özellikle yük artışının olduğu baralarla ilişkili olan hatlar Line_0006_0012, Line_0006_0013 kısıt olarak alınan %90 yüklenmenin üzerine çıktığı görülmektedir. Burada daha önce Python Scriptleri ile tespit edilen 50 çözüm BOA ile uygulanığında önerilen en iyi 5 çözüm uygulanmıştır. Hat yüklenmeleri karşılaştırıldığında çözüm önerilerinin yüklenme oranları belirlenen kısıtın altına düşürdüğü görülmektedir. Aynı çözüm önerileri ile Şekil 7.26 (b)'de gösterilen bara gerilimleri de alt-üst sınırlar içerisinde tutulmuştur. Ayrıca güç siteminde çözüm önerileri ile sisteme eklenen yeni üretim kaynakları Şekil 7.26 (c)'de gösterilmiştir. Buarada normal çalışma anında sistemde 272.4 MW toplam kaynak gücü, 23.Çözüm ve 26. Çözüm önerisinde 667.4 MW'a, 49. ve 24. Çözüm önerinde 657.4 MW'a ve 44. Çözüm önerisinde 620.4 MW' a kadar artmıştır. Sisteme yeni eklenen kaynaklar ile yük artışına bağlı olarak ihtiyaç duyulan gücün artmasıyla üretim kaynaklarının yüklenme kapasitelerinde de artışlar olmaktadır. Bu yüklenme oranları Şekil 7.26 (d)'de verilmiştir. Burada normal çalışma anında generatör yüklenme oranları kritik seviyelerin altında çalışmaktadır. Yük artışından ve sistemdeki yükleri karşılama gereksinimlerinden dolayı özellikle Gen_0001, Gen_0002 ve Gen_0006 kritik seviyenin üzerinde yüklenme kapasitelerine ulaştığı, çözüm önerilerindeki generatör kapasitelerindeki artış ile yüklenme oranlarının kritik seviyelerin altına düşrüldüğü görülmüştür. Bu veriler birlikte değerlendirildiğin 23.Çözümün, hat yüklenmeleri, bara gerilimleri, generatör yüklenme oranları açısından en optimum çözüm olduğu kanıtlanmıştır.

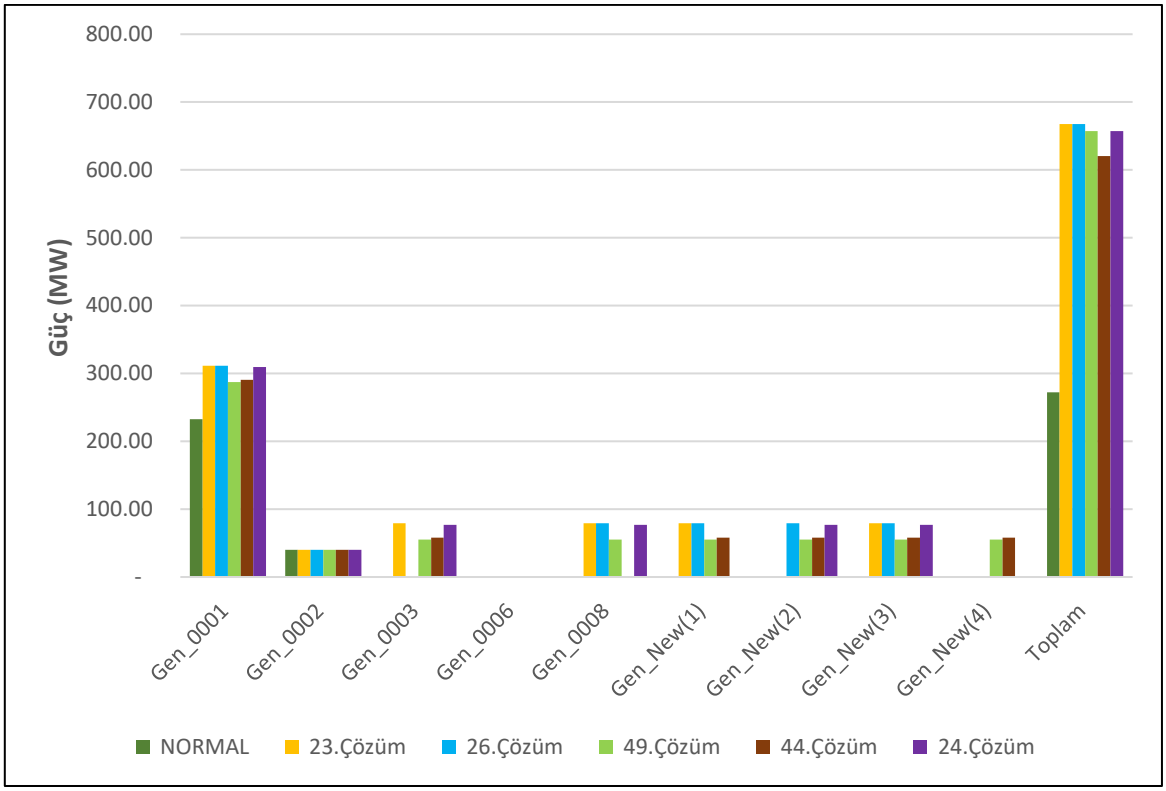


(a)

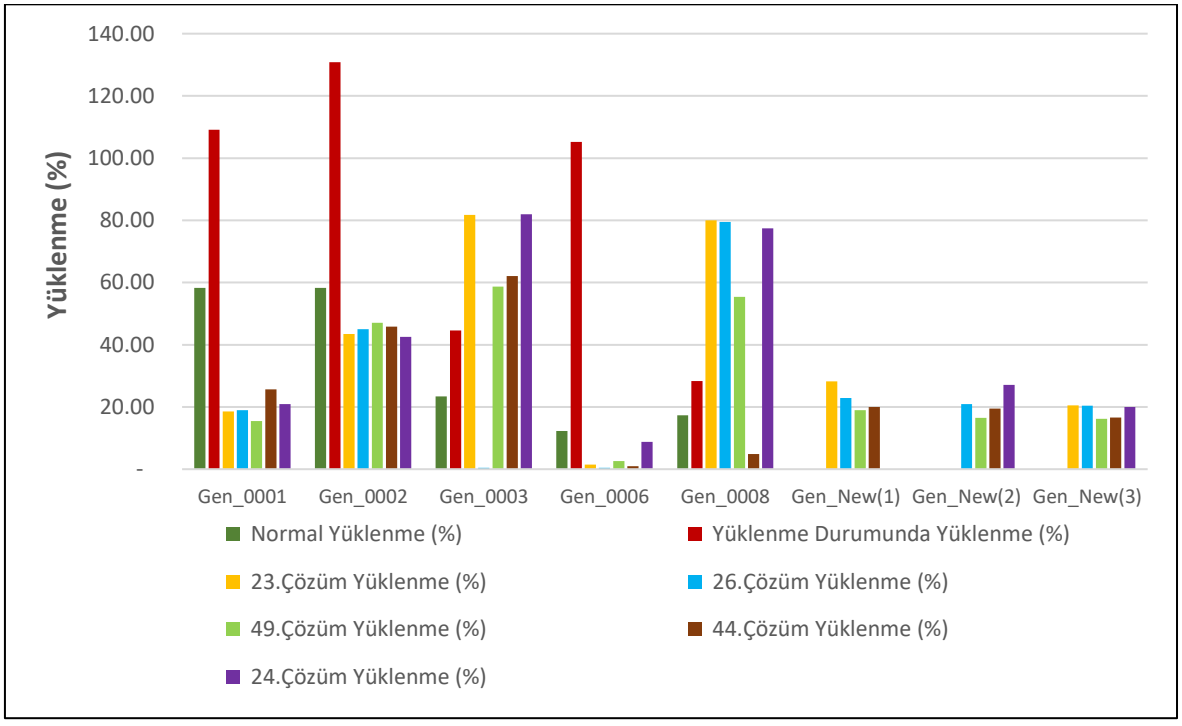


(b)

Şekil 7.29. Senaryo 3 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları



(c)

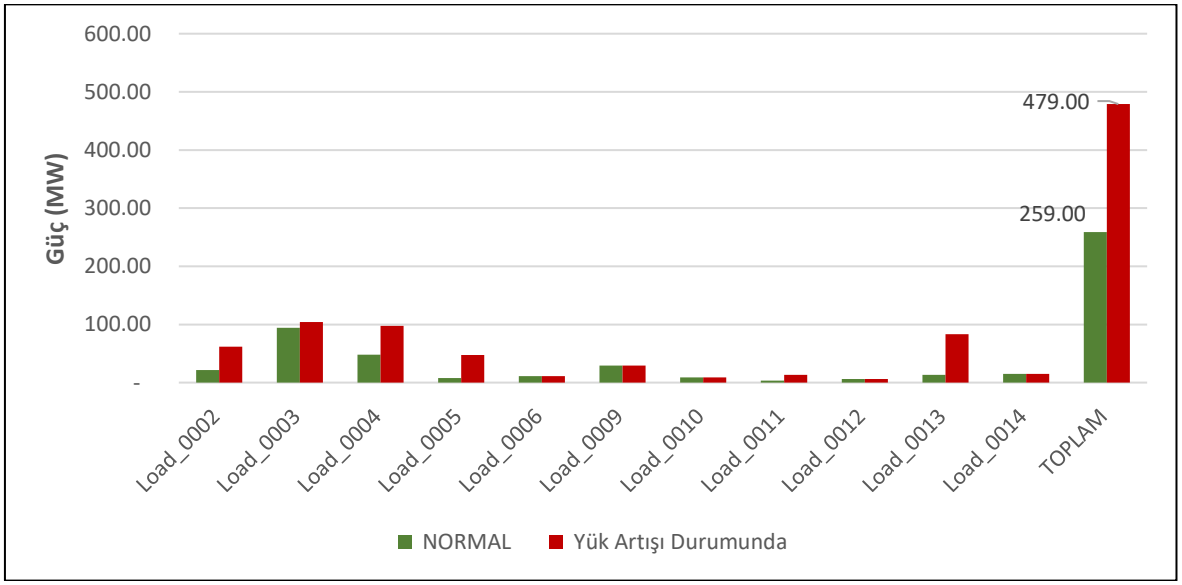


(d)

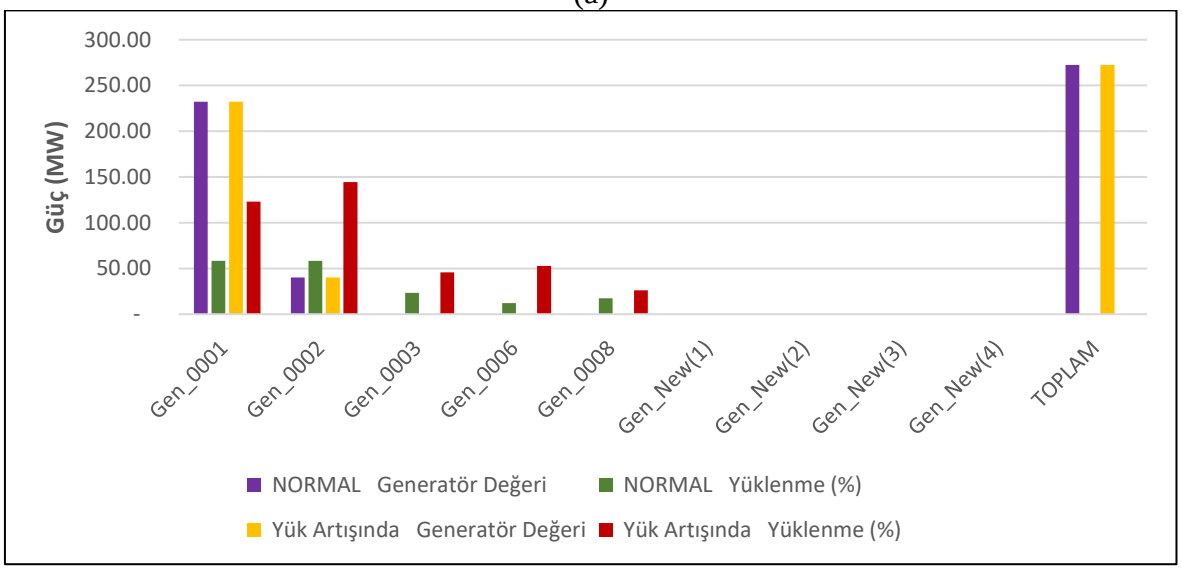
Şekil 7.30. (devam) Senaryo 3 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları

7.3.2. Senaryo 4: 6 ayrı noktada yük değerinin artışı, çözüm üretilmesi ve BOA ile optimum çözüm seçimi

Bu senaryoda altı farklı lokasyonlarda bulunan yükler için değer artışı tanımlanmıştır. Birbirlerinden uzak mesafelerde bulunan Yük 2, Yük 3, Yük4, Yük 5, Yük 11 ve Yük 13 değerleri olmak üzere toplamda 220 MW'lık bir artış tanımlanmış ve benzetim programında uygulanmıştır. Buna göre Yük değerleri, Generatör değerleri ve yüklenmeleri, Hat yüklenmeleri ve bara gerilim değeleri Şekil 7.27'de görülmektedir.

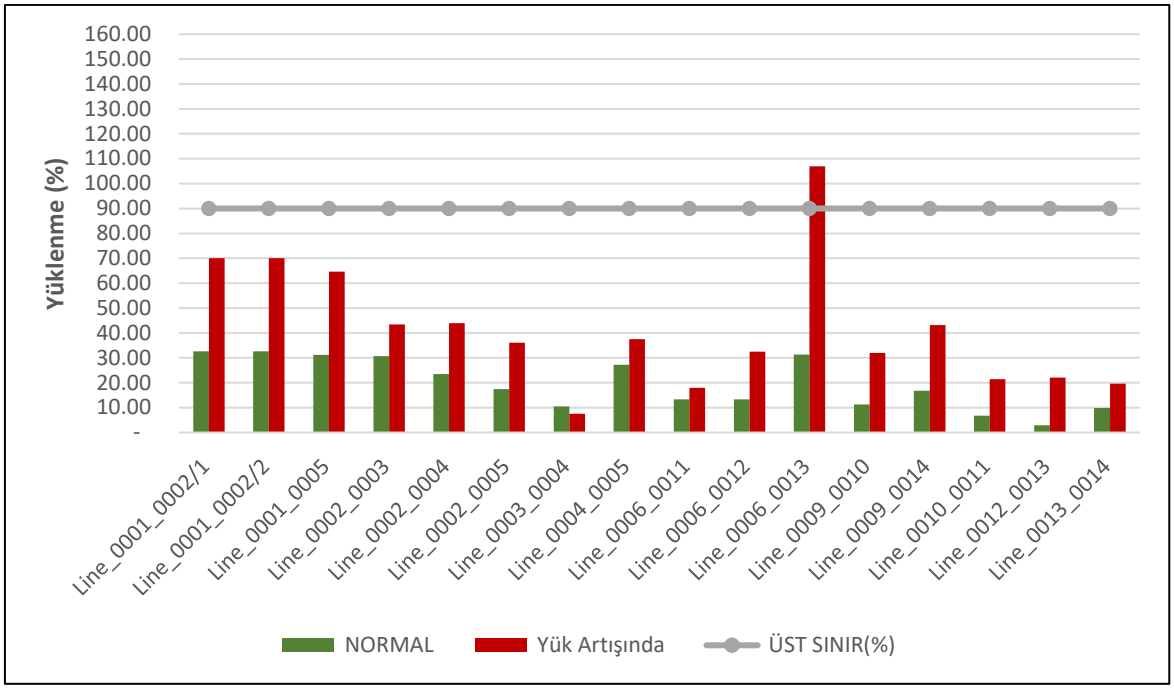


(a)

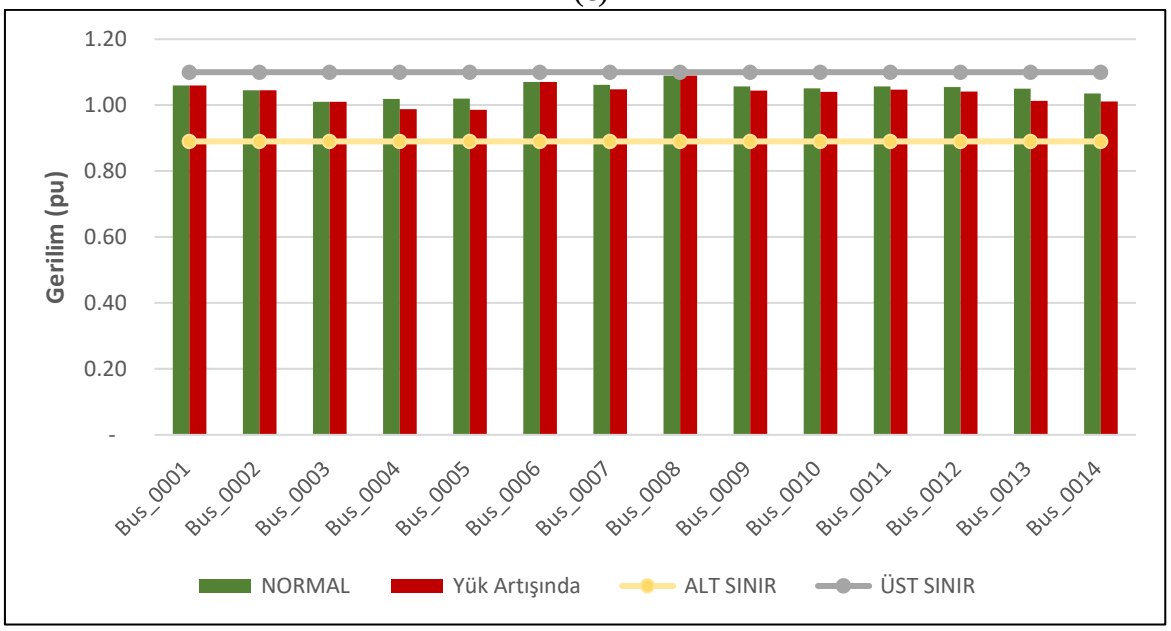


(b)

Şekil 7.31. Senaryo 4 Normal Çalışma ve 6 Noktada Yüklenme Durumlarında (a) Yük Değerleri (b) Generatör Yüklenme Oranları, (c) Hat Yüklenme Oranları (d) Bara Gerilim Değerleri



(c)



(d)

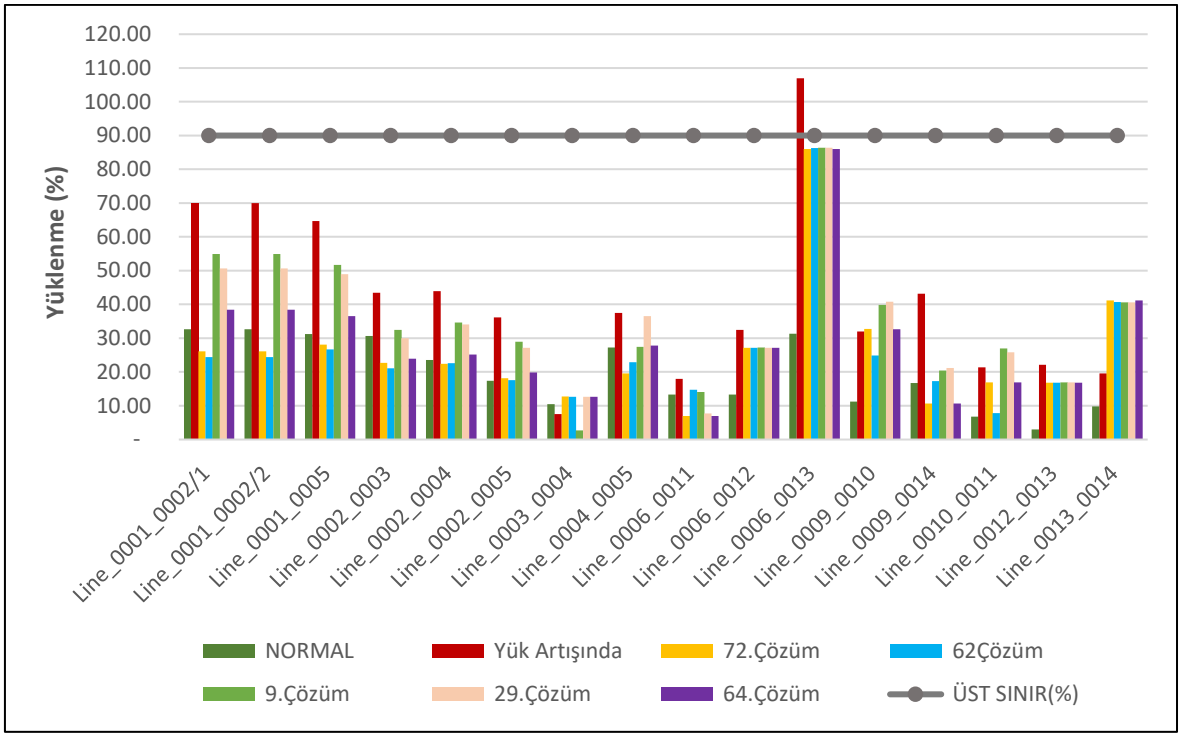
Şekil 7.32. (devam) Senaryo 4 Normal Çalışma ve 6 Noktada Yüklenme Durumlarında (a) Yük Değerleri (b) Generatör Yüklenme Oranları, (c) Hat Yüklenme Oranları (d) Bara Gerilim Değerleri

Şekil 7.27 (a)'da verilen yük değerleri incelendiğinde normal çalışma anında sistemde bulunan 259 MW yük, Yük 2, Yük 3, Yük4, Yük 5, Yük 11 ve Yük 13'lerindeki toplam 220 MW'lık artış ile 479 MW'a ulaşmıştır. Yük değerlerindeki bu artış ile sistemde bulunan generatörlerdeki yüklenme oranları artmış, bu artış ise Şekil 7.27 (b)'de gösterilmiştir. 1 numaralı baraya bağlı Gen_0001 ve 2 numaralı baraya beğlı Gen_0002 üretim kaynaklarında

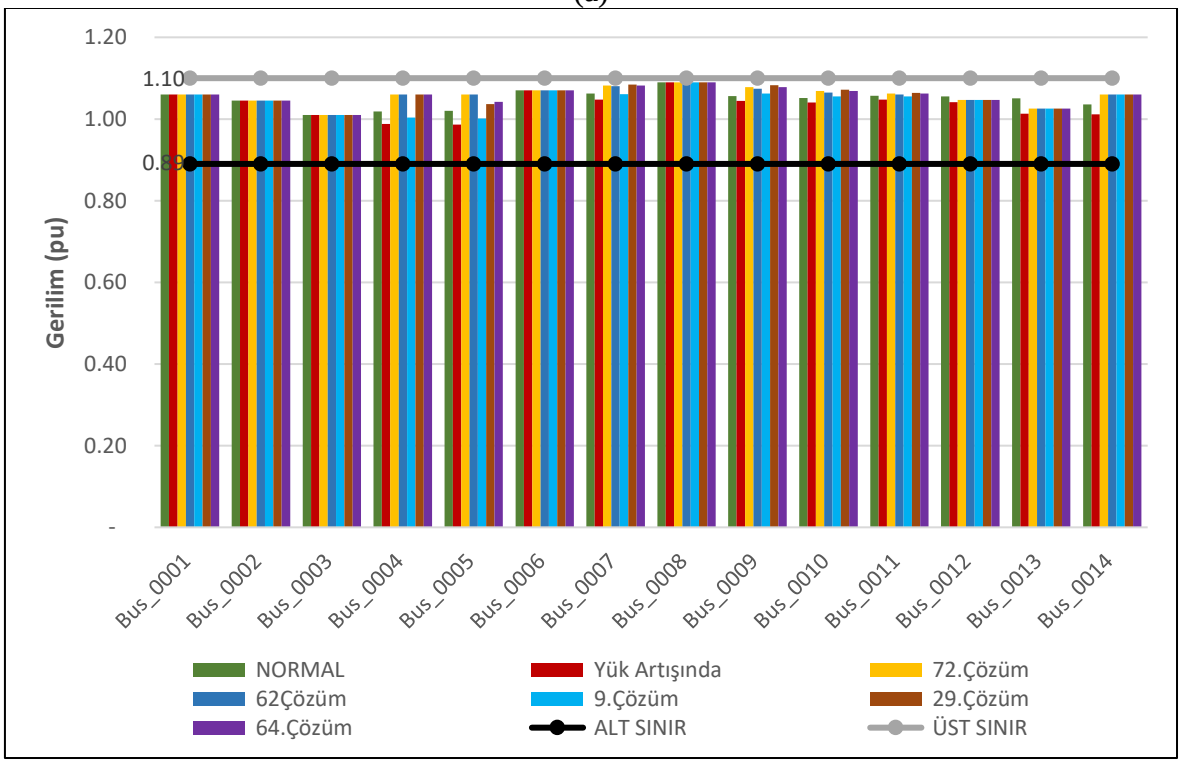
yüklenme oranı kritik sınır olan %100 yüklenme kapasitelerinin üzerine çıkmıştır. Şekil 7.27 (c)'de verilen hat yüklenmeleri incelendiğinde ise tüm hatlardaki yüklenme oranlarında artış olmakla beraber sadece 6 ve 13 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattı Line_0006_0013'de kritik değer aşılmıştır. Şekil 7.27 (d)'de verilen bara gerilimlerinde ise yük artışından kaynaklı bara gerilimlerinde alt-üst sınırın aşılmadığı görülmektedir.

Şekil 7.27'de verilen şekillerde görülen hat yüklenme, genaratör yüklenme problemleri için kaynak tabanlı çözüm arayışı için Pythonda oluşturulan Scritplerde generatörlerin güç değerleri her iterasyonda 1MW artırılmış ve hat yüklenme sınırı %90 olarak tanımlanmıştır. Güç sistemi, Python Script ile tümleşik çalıştırıldığında bu defa 73 farklı çözüm önerisi bulunmuştur. Bir önceki senaryo benzetiminde olduğu gibi, bulunan çözüm önerileri arasından en iyi beş çözüm BOA tarafından belirlenmiştir. Bu optimum beş sonucun benzetim programına uygulanması ile elde edilen değerler Şekil 7.28'de gösterilmiştir.

Şekil 7.28 (a)'da verilen hat yüklenme sonuçlarından görüldüğü üzere, yüklerdeki artış ile sadece Line_006_0013 kritik değer olan %90 sınırının üzerine çıkmıştır. Bununla birlikte, sistem genelinde yük artışına bağlı olarak hatlardaki yüklenme artmıştır. Önerilen çözümler benzetim programında uygulandığında yüklenmenin fazla olduğu hatların kritik değerin altına düştüğü birçok hattın ise normal çalışmadaki yüklenme değerleri seviyesine olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.28 (b)'de verilen bara gerilim değerlerinde kritik seviyelerde bir değişim olmamakla birlikte yüklenmeden kaynaklı bara gerilim düşüşleri, çözüm önerilerindeki kaynak artışları ile giderilmiştir. Son olarak Şekil 7.28 (d)'de verilen generatör yüklenme oranlarından da anlaşılacağı üzere sisteme eklenecek edilecek yeni kaynaklar yük artışına bağlı olarak mevcut kaynaklar üzerinde yüklenme problemini ortadan kaldırmaktadır. Yük artışından en çok etkilenen ve yüklenme oranları kritik seviyenin üzerinde olan Gen_0001 ve Gen_0002 generatörlerinde yüklenme oranları normal çalışma oranlarına yaklaşmıştır.

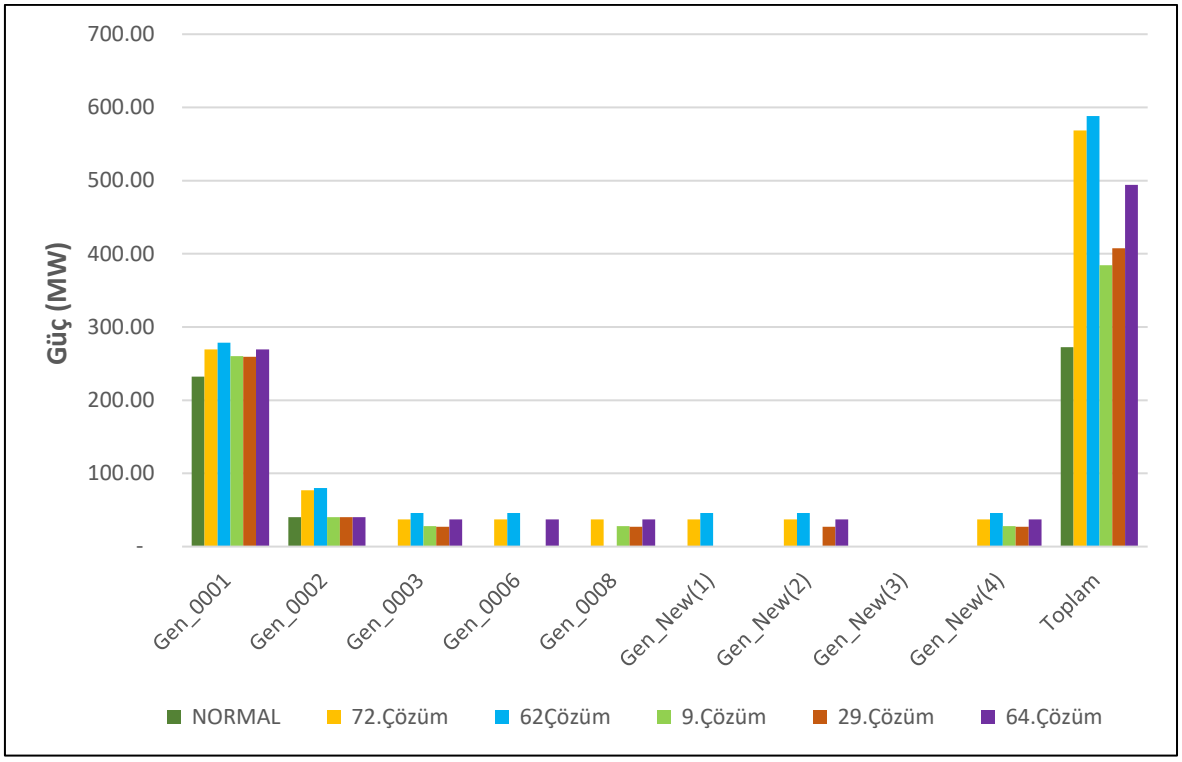


(a)

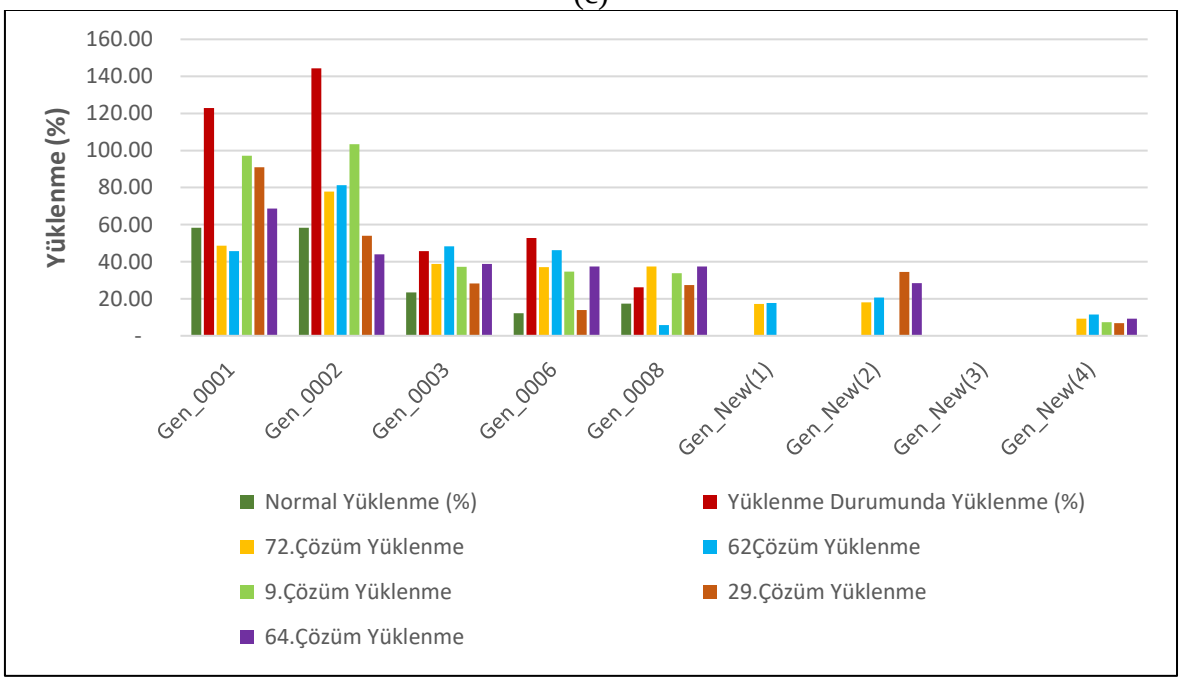


(b)

Şekil 7.33. Senaryo 4 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları



(c)

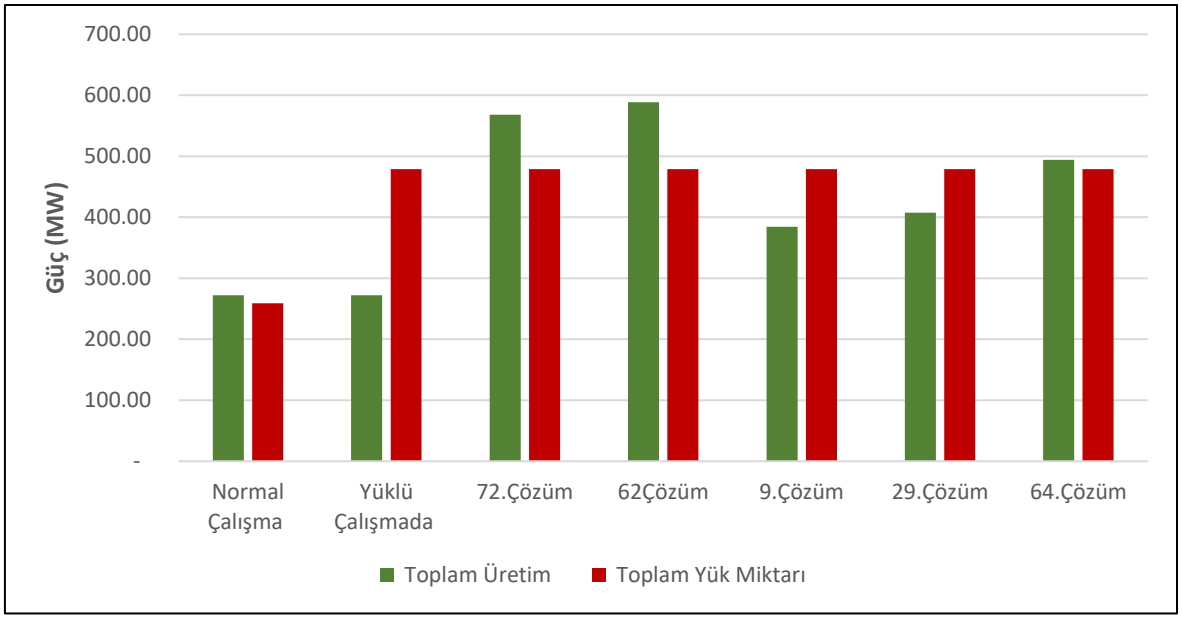


(d)

Şekil 7.34. (devam) Senaryo 4 Çözümlerinin Sistem Parametreleri Üzerin Etkisi (a) Hat Yüklenmeleri (b) Bara Gerilimleri (c) Generatör Değerleri (d)Generatör Yüklenme Oranları

Çözüm önerilerinin benzetim programına uygulanması ile elde edilen Şekil 7.28'de verilen grafikler incelendiğinde farklı generatör kombinasyonları ve değerleri ile hat yüklenme, bara gerilim düşüşleri, generaötr yüklenmeleri gibi problemler çözülmektedir. Bu çözümler

kaynak tabanlı olduğundan dolayı mevcut yük durumu, yüklenme anındaki yük artış miktarı ve bunu karşılayacak üretim kaynaklarının kapasiteleri önerilen çözümler arasından en optimum seçmek önemlidir. Örnek senaryoda güç sisteminde bulunan kaynakların ve yüklerin kapasiteleri Şekil 7.35'de gösterilmiştir.



Şekil 7.35. Senaryo 4 Kaynaklarda Üretilen Güç ve Sistemde Bulunan Yük Miktarı

Şekil 7.35'de verilen grafiklerden anlaşılacağı üzere önerilen 73 farklı çözüm içerisinde BOA ile tespit edilen 5 çözüm önerisinde en optimum değerler 72. Çözümde elde edilmektedir. Çözüm 9 ve Çözüm 29'da daha az kaynak ile hat yüklenme, bara gerilim düşümleri gibi sorunları gideriliyor gibi görünse de bu kaynak kapasiteleri yük artış kapasitesini karşılamamaktadır. Ayrıca 64. Çözüm önerisi ise hattaki doğal yük akışındaki küçük değişimlerde dahi yeterli toleransa sahip olmadığı için en optimum çözüm 72. Çözüm olarak BOA tarafından belirlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde meydana gelecek olası yük değişimleri ve hat değişiklikleri gibi durumlarda kararlılığın sürdürülmesi için üretim tabanlı çözüm önerileri sunan bir modelleme yapılmıştır. IEEE 14 Bara Test Sistemi referans alınarak, güç sistemi benzetimi DigSilent Power Factory ortamında oluşturulmuştur. Ayrıca, olası sorunların benzetiminin yapılabilmesi için güç sisteminde yüklerde değişiklik yapabilecek bir Script, Phyton ortamında oluşturulmuştur. IEEE 14 Bara Test Sistemi, geniş bir güç bölgesinde çalışmak için tasarlandığından, standart parametreleri hat yüklenmeleri ve generatör yüklenmeleri açısından yüksek toleranslı olarak tanımlıdır. Öncelikle, güç sisteminin mevcut kaynaklarla çalışma sınırlarını belirlemek için benzetim çalışmaları yürütülmüştür. Her yük değeri adım adım değiştirilerek yapılan benzetim çalışmalarıyla, hatların yüklenme oranları, bara gerilim değerleri ve generatör yüklenme oranları gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, sistemin kararlılık sınırları dışına çıkacağı yük değerleri tespit edilmiştir.

Sistem kararlılık sınırlarının belirlenmesinin ardından, bu sınırların dışında bir yüklenme olması durumunda çözüm önerileri sunmak üzere Python ortamında yeni bir Script oluşturulmuştur. Dolayısıyla, bu Script ile yapılan benzetim çalışmalarında, önceki script ile belirlenen kararlılık sınır noktalarının üzerinde yük değerleri kullanılmıştır. Kararlılık kriterleri olarak, her hattın yüklenme oranı, generatörlerin yüklenme oranları ve baraların gerilim değerleri dikkate alınmıştır. Hat yüklenme oranı eşik değeri %90, mevcut generatörlerin maksimum yüklenme oranı %99, bara gerilimlerinin alt sınır değeri ise 0.90pu olarak belirlenmiştir. Oluşturulan Script ile bu sınırların dışında çalışan güç sisteminin kararlı duruma geçirilmesi için öncelikle mevcut üreteçlerin güç değerleri maksimum seviye olan %99'a kadar artırılmış, çözüm bulunamaması durumunda ise yeni kaynakların devreye alınması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Güç sistemi değerlerinin yukarıda belirtilen sınırlar içerisine girmesi durumunda bulunan çözüm kaydedilmektedir. Güç sistemini kararlı duruma getirecek birçok çözüm olduğundan, Script her uygun çözümü kaydederek çözüm önerilerini oluşturmaktadır. Oluşturulan çözüm önerileri genel hatlarıyla, farklı bölgelere farklı seviyelerde üreteç eklenmesiyle oluşmaktadır.

Birden çok çözüm önerisinin arasından optimum olanın belirlenmesi için seçim kriterlerinin tanımlanmasını gerekmektedir. Bu noktada, üretim maliyetleri, enerji taşıma maliyeti ve kayıplar göz önünde bulundurularak eklenecek üretim kapasiteleri ve hat mesafeleri kriterler

olarak belirlenmiştir. Bu kriterler doğrultusunda çalıştırılan Bozkurt Optimizasyon Algoritması ile kararlılık açısından en az sapma yaratan çözüm önerileri belirlenmiştir. Dolayısıyla, önerilen bu yapı sayesinde güç sisteminin çalışma yapısında en az seviyede değişiklik yaparak kararlılığın korunması hedeflenmiştir. Bununla birlikte, Bozkurt Optimizasyon Algoritması için tanımlanan amaç fonksiyonu, kayıplar ve maliyetleri dikkate aldığından, önerilen çözümler sadece kararlılık açısından değil optimum işletme açısından da olumlu sonuçlar vermektedir.

Yukarıda bahsi geçen optimum çözüm sonuçları, bölgesel açıdan üretim kaynağı türleri göz önünde bulundurularak yeni bir değerlendirmeye tabi tutulabilir. Bu noktada, meteorolojik veriler kullanılarak bölgelerin yenilebilir enerji kaynak türleri belirlenebilir. Üreteç kurma açısından uygun olmayan ancak kritik öneme sahip noktalar için ise enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılması gelecek çalışmaların bir konusu olarak düşünülebilir.

KAYNAKLAR

1. Ali, A., Padmanaban, S., Twala, B., Marwala, T. (2017). Electric power grids distribution generation system for optimal location and sizing-a case study investigation by various optimization algorithms. *Energies,* 10(7), 1-13.

2. Acharya, N., Mahat, P., Mithulananthan, N. (2006). An analytical approach for DG allocation in primary distribution network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems,* 28, 669-678.

3. Melgar Dominguez, O.D., Pourakbari Kasmaei, M., Lavorato, M., Mantovani, J.R.S. (2018). Optimal siting and sizing of renewable energy sources, storage devices, and reactive support devices to obtain a sustainable electrical distribution systems. *Energy Systems,* 9, 529-550.

4. Yarmoliuk, O., Popov, V., Veremiichuk, Y. (2021). Determination of optimum locations for small renewable energy sources. *EUROCON* 2021 - 19*th IEEE International Conference on Smart Technologies, Proceedings.*

5. Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cursem, T., Vittal, V. (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems,* 19, 1387-1401.

6. EL Sebaay, A., Ramadan, M., Adma, M.A.A. (2017). Studying the Effect of Non-Linear Loads Harmonics on Electric Generator Power Rating Selection. *European Scientific Journal,* 13, 548-561.

7. Eremia, M., Shahidehpour, M. (2013). Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control.

8. Tosun, S., Danışmanı, T., Yalçin, M.A. (2011). Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Sezgisel Yöntemlerle İncelenmesi Doktora Tezi Enstitü Anabilim Dalı : Elektronik Ve Bilgisayar Eğitimi.

9. Chusovitin, P., Pazderin, A., Shabalin, G., Tashchilin, V., Bannykh, P. (2015). Voltage stability analysis using Newton method. 2015 *IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech* 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

10. Bolognani, S., Zampieri, S. (2016). On the existence and linear approximation of the power flow solution in power distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*. 31, 163-172.

11. Wang, Z., Cui, B., Wang, J. (2017). A Necessary Condition for Power Flow Insolvability in Power Distribution Systems with Distributed Generators. *IEEE Transactions on Power Systems.* 32, 1440-1450.

12. Aolaritei, L., Bolognani, S., Dorfler, F. (2018). Hierarchical and distributed monitoring of voltage stability in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems,* 33, 6705-6714.

13. De Jonghe, C., Hobbs, B.F., Belmans, R. (2012). Optimal generation mix with short-term demand response and wind penetration. *IEEE Transactions on Power Systems,* 27.

14. Christy, A., Raj, P.A.D.V., Padmanaban, S., Selvamuthukumaran, R., Ertas, A.H. (2016). A bio-inspired novel optimization technique for reactive power flow. *Engineering Science and Technology an International Journal,* 19, 1682-1692.

15. Ali, A., Padmanaban, S., Twala, B., Marwala, T. (2017). Electric power grids distribution generation system for optimal location and sizing-a case study investigation by various optimization algorithms. *Energies* 10(7), 960.

16. De Leon-Aldaco, S.E., Calleja, H., Aguayo Alquicira, J. (2015). Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review. *IEEE Trans Power Electron*, 30(12).

17. George B. Dantzig (2002). Linear Programming. Oper Res. 50, 42-47.

18. Raja, S., Arguello, B., Pierre, B.J. (2021). Dynamic Programming Method to Optimally Select Power Distribution System Reliability Upgrades. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 8.

19. Fletcher, R. (2000). Practical Methods of Optimization, 9780471915478.

20. AL Ahmad, A., Sirjani, R. (2020). Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review. *Ain Shams Engineering Journa*l, 11(3), 611-628.

21. Saddique, M.S., Bhatti, A.R., Haroon, S.S., Sattar, M.K., Amin, S., Sajjad, I.A., ul Haq, S.S., Awan, A.B., Rasheed, N. (2020). Solution to optimal reactive power dispatch in transmission system using meta-heuristic techniques—Status and technological review. *Electric Power Systems Research*, 178-106031.

22. Devarapalli, R., Bhattacharyya, B., Sinha, N.K. (2020). An intelligent EGWO-SCA-CS algorithm for PSS parameter tuning under system uncertainties. *International Journal of Intelligent System*, 35(10), 1520-1569.

23. Wolpert, D.H., Macready, W.G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1).

24. Abdel-Basset, M., Chakrabortty, R.K., Mohamed, R. (2023). Metaheuristic Algorithms for Healthcare. *Application of Advanced Optimization Techniques for Healthcare Analytics*, 244.

25. Tsai, C.W., Chiang, M.C., Ksentini, A., Chen, M. (2016). Metaheuristic Algorithms for Healthcare: Open Issues and Challenges. *Computers and Electrical Engineering*, 53, 421-434.

26. Balderas, D., Ortiz, A., Méndez, E., Ponce, P., Molina, A. (2021). Empowering Digital Twin for Industry 4.0 using metaheuristic optimization algorithms: case study PCB drilling optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 1295-1306.

27. Shah, P., Sekhar, R., Kulkarni, A.J., Siarry, P. (2021). Metaheuristic Algorithms in Industry 4.0.

28. Wang, Y., Bu, G., Wang, Y., Zhao, T., Zhang, Z., Zhu, Z. (2016). Application of a simulated annealing algorithm to design and optimize a pressure-swing distillation process. *Comput Chem Eng*. 95, 97-107.

29. Dai, Y., Zhou, X., Chu, X., Li, C., Su, Z., Zhu, Z., Cui, P., Qi, J., Wang, Y. (2022). Effect of Entrainer Thermodynamic Properties on the Separation of Ternary Mixtures Containing Two Minimum Boiling Azeotropes by Extractive Distillation. *Ind Eng Chem Res*., 61, 15273-15288.

30. Byles, D., Mohagheghi, S. (2023). Sustainable Power Grid Expansion: Life Cycle Assessment, Modeling Approaches, Challenges, and Opportunities. *Sustainability*, 15(11), 8788.

31. Massoud Amin, S., Wollenberg, B.F. (2005). Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(5), 34-41.

32. Prasad, I. (2014). Smart Grid Technology Application and Control. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3.

33. Agustriyanto, R., Zhang, J. (2007). Obtaining the worst case RGA and RDGA for uncertain systems via optimization. *Proceedings of the American Control Conference.*

34. Han, Q., Wen, M. (2014). An uncertain optimization model for repairable inventory System. *Proceedings of* 2014 *Prognostics and System Health Management Conference*, PHM 2014.

35. Fu, X., Guo, Q., Sun, H. (2020). Statistical Machine Learning Model for Stochastic Optimal Planning of Distribution Networks Considering a Dynamic Correlation and Dimension Reduction, *IEEE Trans Smart Grid*, 11(4), 2904-2917.

36. Fu, X. (2022). Statistical machine learning model for capacitor planning considering uncertainties in photovoltaic power. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(5).

37. Lee, K.Y., El-Sharkawi, M.A. (2007). Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems.

38. Rezk, H., Olabi, A.G., Wilberforce, T., Sayed, E.T. (2023). A Comprehensive Review and Application of Metaheuristics in Solving the Optimal Parameter Identification Problems. *Sustainability*, 15(7), 5732.

39. Rezk, H., Olabi, A.G., Sayed, E.T., Wilberforce, T. (2023). Role of Metaheuristics in Optimizing Microgrids Operating and Management Issues: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 15(6), 4982.

40. Mendoza-Armenta, S., Fuerte-Esquivel, C.R., Becerril, R. (2013). A numerical study of the effect of degenerate Hopf bifurcations on the voltage stability in power systems. *Electric Power Systems Research*, 101, 102-109.

41. Razmi, H., Shayanfar, H.A., Teshnehlab, M. (2012). Steady state voltage stability with AVR voltage constraints. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 43, 650-659

42. Avalos, R.J., Cañizares, C.A., Milano, F., Conejo, A.J. (2009). Equivalency of continuation and optimization methods to determine saddle-node and limit-induced bifurcations in power systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 56, 210-223

43. Kailay, A.K. (2015). Identification of Best Load Flow Calculation Method for IEEE-30 BUS System Using. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 3, 155-161.

44. Hesaroor, K., Das, D. (2020). Improved Modified Newton Raphson Load Flow Method for Islanded Microgrids. 2020 *IEEE 17th India Council International Conference*, INDICON 2020.

45. Gümüş, T.E., Yalçın, M.A., Turan, M., Aksoy Tırmıkçı, C., Yavuz, C. (2021). Steady State Voltage Stability Estimation by Using Local Bus Parameters. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 16, 853-860.

46. Yeşilyurt, T., Akbal, B. (2020). Elektrik Tesislerinde Gerilim Kararlılığının Sağlanması için Kullanılan Yöntemler. *European Journal of Science and Technology.*

47. Katoch, S., Chauhan, S.S., Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed Tools Appl.*, 80, 8091-8126.

48. Wang, D., Tan, D., Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft comput.*, 22, 387-408.

49. Soliman, S.A., Mantaway, A.H., El-Hawary, M.E. (2004). Simulated annealing optimization algorithm for power systems quality analysis. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 26, 31-36.

50. Dorigo, M., Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theor Comput Sci*. 344.

51. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software.* 69, 46-61.

52. Gandomkar, M., Vakilian, M., Ehsan, M. (2005). A combination of genetic algorithm and simulated annealing for optimal DG allocation in distribution networks. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.*

53. Contaxis, G., Vlachos, A. (2000). Optimal power flow considering operation of wind parks and pump storage hydro units under large scale integration of renewable energy sources. 2000 *IEEE Power Engineering Society, Conference Proceedings.*

54. Lei, J., Gong, Q. (2017). Operating strategy and optimal allocation of large-scale VRB energy storage system in active distribution networks for solar/wind power applications. *IET Generation, Transmission and Distribution.* 11.

55. Atwa, Y.M., El-Saadany, E.F. (2010). Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(4), 1815-1822.

56. Kyritsis, E., Andersson, J., Serletis, A. (2017). Electricity prices, large-scale renewable integration, and policy implications. *Energy Policy*. 101, 550-560.

57. Aaslid, P., Korpås, M., Belsnes, M.M., Fosso, O.B. (2021). Pricing electricity in constrained networks dominated by stochastic renewable generation and electric energy storage. *Electric Power Systems Research*, 197, 107169.

58. Georgilakis, P.S., Hatziargyriou, N.D. (2013). Optimal distributed generation placement in power distribution networks: Models, methods, and future research. *IEEE Transactions on Power Systems.* 28(3), 3420-3428.

59. Hung, D.Q., Mithulananthan, N., Bansal, R.C. (2010). Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 25(3), 814-820.

60. Fathi, R., Tousi, B., Galvani, S. (2023). Allocation of renewable resources with radial distribution network reconfiguration using improved salp swarm algorithm. *Appl Soft Comput.* 132, 109828.

61. Coelho, A., Rodrigues, A.B., Da Silva, M.G. (2004). Distribution network reconfiguration with reliability constraints. 2004 *International Conference on Power System Technology*, POWERCON 2004.

62. Syahputra, R., Wiyagi, R.O., Suripto, S., Soesanti, I. (2017). Optimization of distribution network configuration using evolutionary algorithm approach. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12.

63. Abdelaziz, A.Y., Mekhamer, S.F., Badr, M.A.L., Mohamed, F.M., El-Saadany, E.F. (2009). A modified particle swarm algorithm for distribution systems reconfiguration. 2009 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, PES ’09.

64. Olamaei, J., Niknam, T., Arefi, S.B. (2012). Distribution feeder reconfiguration for loss minimization based on modified honey bee mating optimization algorithm. *Energy Procedia*, 14, 304-311.

65. Khoa, T.Q.D., Binh, P.T.T. (2006). A hybrid Ant Colony Search based reconfiguration of distribution network for loss reduction. 2006 *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, TDC’06.

66. Afzalan, E., A. Taghikhani, M., Sedighizadeh, M. (2012). Optimal Placement and Sizing of DG in Radial Distribution Networks Using SFLA. *International Journal of Energy and Engineering*, 2(3), 73-77.

67. Eusuff, M., Lansey, K., Pasha, F. (2006). Shuffled frog-leaping algorithm: A memetic meta-heuristic for discrete optimization. *Engineering Optimization*, 38, 129-154.

68. Barnwal, A.K., Yadav, L.K., Verma, M.K. (2022). A Multi-Objective Approach for Voltage Stability Enhancement and Loss Reduction under PQV and P Buses Through Reconfiguration and Distributed Generation Allocation. *IEEE Access*. 10.

69. Rao, R.S., Ravindra, K., Satish, K., Narasimham, S.V.L. (2013). Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 28(1), 317-325.

70. Gonzalez-Longatt, F., Rueda, J. (2014). PowerFactory Applications for Power System Analysis.

71. Moretti Da Rosa, W., Gerez, C., Belati, E.A. (2018). Optimal Distributed Generation Allocating Using Particle Swarm Optimization and Linearized AC Load Flow. *IEEE Latin America Transactions,* 16(10), 2665-2670.

72. Rossoni, P., Moreti Da Rosa, W., Antonio Belati, E. (2016). Linearized AC Load Flow Applied to Analysis in Electric Power Systems. *IEEE Latin America Transactions,* 14(9), 4048-4053.

73. Lim, D., Ong, Y.S., Jin, Y., Sendhoff, B., Lee, B.S. (2007). Efficient Hierarchical Parallel Genetic Algorithms using Grid computing. *Future Generation Computer Systems*, 23(4), 658-670.

74. Deng, X., Lv, T. (2020). Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models, *Journal of Cleaner Production,* 246, 118962.

75. Payasi, R.P., Singh, A.K., Singh, D. (2018). Planning of different types of distributed generation with seasonal mixed load models. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, (4), 112-124.

76. Elkadeem, M.R., Abd Elaziz, M., Ullah, Z., Wang, S., Sharshir, S.W. (2019). Optimal Planning of Renewable Energy-Integrated Distribution System Considering Uncertainties. *IEEE Access*. 7, 164887 – 164907.

77. Jagtap, K.M., Khatod, D.K. (2016). Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 75, 173-186.

78. Holttinen, H., Kiviluoma, J., Cutululis, N., Gubina, A., Keane, A., Van Hulle, F. (2012). Ancillary services: technical specifications, system needs and costs. *Deliverable* D2. 2.

79. Bayindir, R., Yeşİlbudak, M., ÇetİnkaYa, Ü. (2015). Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler, *Gazi University Journal of Science* 3, 595-602.

80. Kumar, G.N., Kalavathi, M.S. (2011). Reactive power compensation for large disturbance voltage stability using FACTS controllers. *ICECT 2011 - 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology.*

81. Chapman, J.W., Ilic, M.D. (1994). New model formulation for power system voltage control during large disturbances. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control.*

82. Wang, W., Ni, J., Ngan, H.W. (2005). Small-disturbance voltage stability study on Shaanxi power system. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference.*

83. Ge, H., Guo, Q., Sun, H., Wang, B., Zhang, B., Liu, J., Yang, Y., Qian, F. (2018). An improved real-time short-term voltage stability monitoring method based on phase rectification. *IEEE Transactions on Power Systems.* 33(1), 1068-1070.

84. Wang, K., Ye, M., Xiong, W., Wang, F., Hou, J. (2016). Coordinated control of STATCOM and mechanically switched capacitors to improve short-Term voltage stability. *2016 IEEE International Conference on Power System Technology*, POWERCON 2016.

85. Dong, Y., Xie, X., Li, G., Zhou, B., Yao, W. (2016). A wide-area var-voltage control method for generators to improve short-term voltage stability. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON.*

86. Kundur, P., Paserba, J., Vitet, S. (2003). Overview on definition and classification of power system stability. *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*, CIGRE/PES 2003.

87. Pan, P., Sun, Y., Yuan, C., Yan, X., Tang, X. (2021). Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111048.

88. Zhang, J., Ding, M., Li, S. (2009). Research on under-voltage load-shedding to prevent voltage collapse of electric power system. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, APPEEC.

89. Alzahawi, T., Sachdev, M.S., Ramakrishna, G. (2018). Time to voltage collapse dependence of load shedding to avoid voltage collapse. *2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, EPEC 2017.

90. Reis, C., Andrade, A., Maciel Barbosa, F.P. (2009). Methods for preventing voltage collapse. *ELECO 2009 - 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering.*

91. Monteiro Pereira, R.M., Machado Ferreira, C.M., Maciel Barbosa, F.P. (2015). Reactive power management of a wind farm to prevent voltage collapse of an electric power system. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference.*

92. Fesli, U., Özdemir, M.B., Özdemir, Ş. (2023). IEEE 14 Bara Sistemine Bağlanabilecek Maksimum Yük Seviyelerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 11(1), 111-132.

93. Tan, W.S., Hassan, M.Y., Majid, M.S., Rahman, H.A. (2012). Allocation and sizing of DG using Cuckoo Search algorithm. *PECon 2012 - 2012 IEEE International Conference on Power and Energy.*

94. Glover. D. J., (2016). Power System Analysis and Design. Cengage, 220-241

95. Kusekwa, M.A. (2014). Load Flow Solution of the Tanzanian Power Network Using Newton-Raphson Method and MATLAB Software. *International Journal of Energy and Power Engineering.* 3, 277.

96. Ganesan, V., Sobhana, M., Anuradha, G., Yellamma, P., Devi, O.R., Prakash, K.B., Naren, J. (2021). Quantum inspired meta-heuristic approach for optimization of genetic algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 94, 107356.

97. Boussaïd, I., Lepagnot, J., Siarry, P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Science*, 237, 82-117.

98. Dréo, J, Siarry, Petrowski, A., Taillard. E., (2006). Metaheuristics for Hard Optimization. *Springer.* 340-375

99. Knypiński, Ł. (2019). Adaptation of the penalty function method to genetic algorithm in electromagnetic devices designing. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 38.

100. Meng, Z., Li, G., Wang, X., Sait, S.M., Yıldız, A.R. (2021). A Comparative Study of Metaheuristic Algorithms for Reliability-Based Design Optimization Problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 28, 1853-1891.

101. Nassef, A.M., Abdelkareem, M.A., Maghrabie, H.M., Baroutaji, A. (2023). Review of Metaheuristic Optimization Algorithms for Power Systems Problems. *Sustainability*. 15(12), 9434.

102. Ramadan, H.S., Haes Alhelou, H., Ahmed, A.A. (2022). Impartial near-optimal control and sizing for battery hybrid energy system balance via grey wolf optimizers: Lead acid and lithium-ion technologies. *IET Renewable Power Generation*, 1-14.

103. Kargarian, A., Mohammadi, J., Guo, J., Chakrabarti, S., Barati, M., Hug, G., Kar, S., Baldick, R. (2018). Toward Distributed/Decentralized DC Optimal Power Flow Implementation in Future Electric Power Systems. *IEEE Trans Smart Grid*, 9(4), 2574 - 2594.

104. Shaheen, M.A.M., Hasanien, H.M., Mekhamer, S.F., Talaat, H.E.A. (2019). Optimal power flow of power systems including distributed generation units using sunflower optimization algorithm. *IEEE Access*, 7, 109289-109300.

105. Cain, M., O'Neill, R., Castillo, A. (2012). History of Optimal Power Flow and Formulations. *Federal Energy Regulatory Commission*, 1-36.

106. Peschon J, Bree, D., Hajdu LP. (1972). Optimal power- flow solutions for power system planning. *Proceedings of the IEEE*, 60.

107. Nıu, M., Wan, C., Xu, Z. (2014). A review on applications of heuristic optimization algorithms for optimal power flow in modern power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2, 289-297.

108. Bhattacharya, A., Roy, P.K. (2012). Solution of multi-objective optimal power flow using gravitational search algorithm. *IET Generation, Transmission and Distribution.* 6(8), 751-763.

109. Joshi, S.K., Ghanchi, V.H. (2013). Solution of optimal power flow subject to security constraints by an Ant Colony Optimization. *IET Conference Publications.*

110. Gasbaoui, B., Allaoua, B. (2009). Ant Colony Optimization Applied on Combinatorial Problem for Optimal Power Flow Solution. *Leonardo Journal of Sciences*, 14, 1-17.

111. Allaoua, B., Laoufi, A. (2008). Collective intelligence for optimal power flow solution using ant colony optimization. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 7, 88-105.

112. Allaoua, B., Laoufi, A. (2009). Optimal power flow solution using ant manners for electrical network. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 9, 1-7.

113. Mahdad, B., Srairi, K. (2015). Blackout risk prevention in a smart grid based flexible optimal strategy using Grey Wolf-pattern search algorithms. *Energy Convers and Management*, 98, 411-429.

114. Abdul kadir, A.F., Mohamed, A., Shareef, H., Che Wanik, M.Z. (2013). Optimal placement and sizing of distributed generations in distribution systems for minimizing losses and THDv using evolutionary programming. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21, 2269-2282.

115. Khoa, T.Q.D., Binh, P.T.T., Tran, H.B. (2006). Optimizing location and sizing of distributed generation in distribution systems. *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, PSCE 2006 – Proceedings, 725-732.

116. Elsaiah, S., Benidris, M., Mitra, J. (2014). Analytical approach for placement and sizing of distributed generation on distribution systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 8, 995-1186.

117. Gopiya Naik, S.N., Khatod, D.K., Sharma, M.P. (2015). Analytical approach for optimal siting and sizing of distributed generation in radial distribution networks. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 9, 209-305.

118. Viral, R., Khatod, D.K. (2015). An analytical approach for sizing and siting of DGs in balanced radial distribution networks for loss minimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 67, 191-201.

119. Keane, A., O'Malley, M. (2005). Optimal allocation of embedded generation on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, 1640-1646.

120. Le, A.D.T., Kashem, M.A., Negnevitsky, M., Ledwich, G. (2007). Optimal distributed generation parameters for reducing losses with economic consideration. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-8.

121. Gkaidatzis, P.A., Bouhouras, A.S., Doukas, D.I., Sgouras, K.I., Labridis, D.P. (2017). Load variations impact on optimal DG placement problem concerning energy loss reduction. *Electric Power Systems Research*, 152, 36-47.

122. Sultana, U., Khairuddin, A.B., Mokhtar, A.S., Zareen, N., Sultana, B. (2016). Grey wolf optimizer based placement and sizing of multiple distributed generation in the distribution system. *Energy*, 111, 525-536.

123. Prenc, R., Škrlec, D., Komen, V. (2013). Distributed generation allocation based on average daily load and power production curves. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 53, 612-622.

124. Savić, A., Durišić, Ž. (2014). Optimal sizing and location of SVC devices for improvement of voltage profile in distribution network with dispersed photovoltaic and wind power plants. *Appl Energy*. 134, 114-124.

125. Kumawat, M., Gupta, N., Jain, N., Bansal, R.C. (2017). Swarm-Intelligence-Based Optimal Planning of Distributed Generators in Distribution Network for Minimizing Energy Loss. *Electric Power Components and Systems*, 45, 589-600.

126. Sharma, D., Yadav, N.K., Gunjan, Bala, A. (2017). Impact of distributed generation on voltage profile using different optimization techniques. *ICCCCM 2016 - 2nd IEEE International Conference on Control Computing Communication and Materials.*

127. Mohammadi, M., Nafar, M. (2013). Optimal placement of multitypes DG as independent private sector under pool/hybrid power market using GA-based Tabu Search method. *International Journal of Electrical Power and Energy System*s, 51, 43-53.

128. Sarkar, B.K., Chakrabarti, A. (2016). OPF governed determination of location and size of distribution generators using gravitational search algorithm. *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication.*

129. Fazliana Abdul Kadir, A., Mohamed, A., Shareef, H., Asrul Ibrahim, A., Khatib, T., Elmenreich, W. (2014). An improved gravitational search algorithm for optimal placement and sizing of renewable distributed generation units in a distribution system for power quality enhancement. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 6, 033112.

130. Devi, S., Geethanjali, M. (2014). Application of Modified Bacterial Foraging Optimization algorithm for optimal placement and sizing of Distributed Generation. *Expert Systems with Applications.* 41, 2772-2781.

131. Cheng, S., Chen, M.Y., Fleming, P.J. (2015). Improved multi-objective particle swarm optimization with preference strategy for optimal DG integration into the distribution system. *Neurocomputing*, 148, 23-29.

132. Fadel, W., Kilic, U., Taskin, S. (2017). Placement of Dg, Cb, and Tcsc in radial distribution system for power loss minimization using back-tracking search algorithm. *Electrical Engineering*, 99, 791-802.

133. El-Fergany, A. (2015). Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64, 1197-1205.

134. Kefayat, M., Lashkar Ara, A., Nabavi Niaki, S.A. (2015). A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources. *Energy Conversion and Management*. 92, 149-161.

135. Sulaiman, M.H., Mustaffa, Z., Mohamed, M.R., Aliman, O. (2015). Using the gray wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem. *Applied Soft Computing Journal*, 32, 286-292.

136. Acharya, S., Sivarajan, G., Kumar, D.V., Srikrishna, S. (2022). Modeling combined economic emission dispatch for renewable energy system via Levy-based glowworm swarm optimization. *Kybernetes*, 3315-3337.

137. Hawas, M.N., Hasan, I.J., Mnati, M.J. (2022). Simulation and analysis of the distributed photovoltaic generation systems based on DIgSILENT power factory. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 28(3), 1227-1238.

138. Murali, N., Gobimohan, S. (2021). Power Flow Analysis of IEEE 33 Bus Radial Distribution Systems using DigSilent. *International Journal of Innovations in Management, Engineering and Science* (IJIMES), 7.

139. Kharrazi, A. (2015). Simulation of Artificial Neural Network Based Power System Stabilizer using Digsilent Power Factory and Matlab Interface. *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal*, 4(4), 11-20.

140. Schlabbach, J., Rofalski, K.H. (2014). *Power System Engineering: Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment*, Wiley.



Gazili olmak ayrıcalıktır